

**DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES
ASOCIADAS A LA ENFERMEDAD DE PARKINSON (EP)**

FRANKLIN ALBERTO FAJARDO VILLANUEVA

SANDRA MARCELA LÓPEZ TORRES



UNIVERSIDAD DE LA COSTA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2018

**DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA LA ADQUISICIÓN DE SEÑALES
ASOCIADAS A LA ENFERMEDAD DE PARKINSON (EP)**

FRANKLIN ALBERTO FAJARDO VILLANUEVA

SANDRA MARCELA LÓPEZ TORRES

**PROYECTO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

TUTOR

MG. ZHOE COMAS GONZÁLEZ

COTUTOR

MG. JOSÉ SIMANCAS GARCÍA.

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

2018

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por permitirnos culminar de manera satisfactoria todas las metas trazadas en el desarrollo del proyecto y permitirme haber llegado hasta este momento de mi formación profesional.

A mi madre Diana Villanueva por su incondicional y constante apoyo y por la confección del primer guante desarrollado.

A mi padre Franklin Fajardo porque a pesar de las dificultades, siempre estuvo pendiente de mis todas las veces que dormí fuera de casa o llegaba en la madrugada después de arduas jornadas de trabajo.

A mi hermano Sergio por apoyarme en momentos en donde necesitaba soporte y acompañamiento técnico.

A mi novia Paula que estuvo conmigo en las situaciones más difíciles emocionalmente dándome aliento para continuar a pesar de las dificultades.

A mi primo Francisco que siempre estuvo pendiente del desarrollo del proyecto y apoyándome en la toma de decisiones asertivas.

Franklin Fajardo Villanueva

Quiero dedicarle este trabajo:

A Dios por traerme a la vida, brindarme un sin número de hermosas experiencias, protegerme y guiarme hasta este punto de mi formación. De Él, por Él y para Él son todas las cosas.

A mi madre Martha Torres por su apoyo incondicional, su constante interés en mi bienestar, su dureza al momento de corregir y el extraordinario (casi infinito) amor que entrega a la familia.

A mi padre Humberto López por ser el soporte del hogar, por su ayuda creativa en momentos cruciales, por mimarme y siempre regalarme una sonrisa.

A mi hermano Humberto López por acercarme a la electrónica, por su buen ejemplo, por estar pendiente de mis necesidades y ubicación, por su singular, pero importante afecto.

A todas aquellos que han traído aportes significativos a mi vida y recuerdos inolvidables.

Sandra Marcela López Torres

Agradecimientos

Los autores agradecen sinceramente:

Al Ing. Heyder Páez por creer en nuestras capacidades e impulsar el desarrollo del proyecto. Asimismo, por la motivación, la asesoría, el acompañamiento y su buena disposición en todo momento.

A la Ing. Zhoe Comas por acogernos y guiar la culminación del proyecto. También, por el notorio esmero y apoyo para que lográramos entregar un producto de calidad.

Al Ing. Jose Simancas por asesorarnos, atender nuestras inquietudes y respaldarnos.

A la Universidad de la Costa CUC, por ser el plantel de estudios superiores que nos formó como Ingenieros Electrónicos durante 5 años y por girar los recursos necesarios para la compra de equipos y componentes relacionados con el proyecto.

Al Dr. José Vargas Manotas, neurólogo especialista, y a la docente Sonia Farelo por colaborarnos en la búsqueda de personas con Enfermedad de Parkinson.

A nuestras madres, Martha Torres y Diana Villanueva, por contribuir en la consecución de los guantes del dispositivo electrónico.

A todas las personas que accedieron a participar de manera voluntaria en las pruebas del dispositivo electrónico, por el tiempo, la atención y la colaboración prestada.

Resumen

La Enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno degenerativo del sistema nervioso central, caracterizado por temblores, rigidez muscular y lentitud de movimiento. En el presente estudio se identificaron limitaciones o dificultades en el diagnóstico de la EP, que admiten la confusión con trastornos parecidos. Por ende, se propuso desarrollar un dispositivo electrónico para la adquisición de señales asociadas a la EP. Como solución tecnológica, a fin de apoyar el diagnóstico y mejorar el seguimiento de esta enfermedad. En el estudio se consultó el estado actual de dispositivos con el mismo enfoque, se caracterizaron las señales biológicas a medir, se creó el dispositivo y se puso a prueba. El dispositivo electrónico se acompaña de una interfaz gráfica para visualizar datos, creada en LabVIEW.

Palabras clave: diagnóstico, dispositivo electrónico, Enfermedad de Parkinson, interfaz gráfica, síntomas

Abstract

Parkinson's disease (PD) is a degenerative disorder of the central nervous system, characterized by tremors, muscle stiffness and slowness of movement. In this study, some limitations and difficulties were identified in the diagnosis of the PD, which admit confusion with similar disorders. Therefore, it was proposed to develop an electronic device for the acquisition of signals associated with PD, as a technological solution, in order to support diagnosis and improve its monitoring. In this study, the current state of devices with the same perspective were consulted, biological signals were characterized, the device was built and was tested. The electronic device has also a graphic interface which visualize the data measured. This software was created in the LabVIEW platform.

Keywords: *diagnosis, electronic device, Parkinson's disease, graphic interface, symptoms*

Contenido

Introducción.....	18
1. Planteamiento	20
2. Objetivos.....	21
2.1. Objetivo general	21
2.2. Objetivos específicos	21
3. Justificación	22
4. Marco teórico y estado del arte.....	24
4.1. Epidemiología.....	26
4.2. Diagnóstico	27
4.3. Fisiopatología	30
4.4. Tratamiento y seguimiento	31
4.4.1. Farmacoterapia	32
4.4.2. Terapia física y ocupacional	34
4.4.3. Método cualitativo.....	35
4.4.4. Método Cuantitativo	35
4.5. Tecnologías desarrolladas.....	36
4.6. Sensores de movimiento	38
4.7. Ruido en señales biológicas.....	39
5. Metodología.....	41
6. Análisis bibliográfico de la literatura	44

6.1.	Palabras clave	44
6.2.	Fuentes de consulta.....	45
6.3.	Cadenas de búsqueda.....	45
6.4.	Selección de artículos	47
6.5.	Clasificación y documentación de la información	49
7.	Construcción del dispositivo electrónico.....	50
7.1.	Caracterización de las señales biológicas.....	50
7.1.1.	Señales y síntomas de la Enfermedad de Parkinson.....	50
7.1.2.	Señales y síntomas a medir.....	53
7.1.3.	Selección de sensores y microcontrolador.....	54
7.2.	Diseño de hardware y software	60
7.2.1.	Diagrama estructural y algoritmo	60
7.2.2.	Selección de las herramientas.....	62
7.2.3.	Circuito esquemático e impreso	63
7.2.4.	Código fuente	66
7.2.5.	Interfaz gráfica.....	70
7.2.6.	Hardware del dispositivo.....	76
8.	Puesta a punto.....	83
8.1.	Población y muestra	83
8.2.	Pruebas de funcionamiento.....	83
8.3.	Análisis de resultados	87
8.3.1.	Posición 1 (reposo, mano y antebrazo apoyados en la pierna).....	87
8.3.2.	Posición 2 (extremidad superior extendida, sin apoyo).....	91

8.3.3. Acción 1 (escribir)	94
8.3.4. Acción 2 (saludar)	97
8.3.5. Síntesis.....	100
9. Conclusiones.....	102
Referencias	104

Lista de tablas y figuras

Tablas.

Tabla 1. Metodología del proyecto	41
Tabla 2. Matriz de papers	47
Tabla 3. Sensores evaluados	55
Tabla 4. Materiales, componentes y herramientas	77
Tabla 5. Tareas asignadas al participante durante la adquisición de datos.....	84

Figuras.

Figura 1. Diagrama de bloques del dispositivo adquisición	60
Figura 2. Diagrama de flujo de procesos en Arduino Nano	61
Figura 3. Conexiones del dispositivo de adquisición	64
Figura 4. Circuito de terminales para Arduino Nano (diseño esquemático)	65
Figura 5. Circuito de terminales para Arduino Nano (diseño PCB).....	66
Figura 6. Fragmento código fuente - configuración inicial	67
Figura 7. Fragmento código fuente - borrar datos SD	67
Figura 8. Fragmento código fuente - leer y calcular pulso cardiaco	68
Figura 9. Fragmento código fuente - leer y calcular velocidad angular	68
Figura 10. Fragmento código fuente - leer y calcular aceleración	69
Figura 11. Fragmento código fuente - leer y calcular temperatura	69
Figura 12. Fragmento código fuente – escribir datos SD	70
Figura 13. Interfaz inicial	71

Figura 14. Interfaz al abrir algún archivo	71
Figura 15. Código fuente de la interfaz gráfica	72
Figura 16. PCB fabricado	78
Figura 17. Dispositivo electrónico (guante versión 1)	79
Figura 18. Dispositivo electrónico (guante versión 2)	80
Figura 19. Abriendo archivo DATA en el computador.....	85
Figura 20. Abriendo archivo DATA en el computador.....	86
Figura 21. EP-S-02-D, Grupo A, Posición 1	88
Figura 22. EP-S-17-D, Grupo A, Posición 1	88
Figura 23. EP-C-03-D, Grupo B, Posición 1	89
Figura 24. EP-C-05-D, Grupo B, Posición 1	89
Figura 25. EP-S-02-D, Grupo A, Posición 2	91
Figura 26. EP-S-17-D, Grupo A, Posición 2	92
Figura 27. EP-C-06-D, Grupo B, Posición 2.....	92
Figura 28. EP-C-05-D, Grupo B, Posición 2.....	93
Figura 29. EP-S-02-D, Grupo A, Acción 1	94
Figura 30. EP-S-17-D, Grupo A, Acción 1	95
Figura 31. EP-C-03-D, Grupo B, Acción 1	95
Figura 32. EP-C-05-D, Grupo B, Acción 1	96
Figura 33. EP-S-02-D, Grupo A, Acción 2	97
Figura 34. EP-S-17-D, Grupo A, Acción 2	98
Figura 35. EP-C-01-D, Grupo B, Acción 2	98
Figura 36. EP-C-06-D, Grupo B, Acción 2	99

Lista de anexos

Anexo 1. Formato de consentimiento informado	112
--	-----

Glosario

Acelerómetro: dispositivo que mide la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura.

Alfa-sinucleína: proteína relacionada con la Enfermedad de Parkinson, puede causar neurodegeneración mediante la inhibición de la autofagia, el proceso en el cual las células digieren algunos de sus contenidos.

Atacado: proceso que consiste en introducir una baquelita virgen fotograbada o recubierta con tinta en una solución química para eliminar el cobre excedente y formar un patrón.

Bradicinesia: lentificación de los movimientos, especialmente de los movimientos voluntarios complejos. Es característica de las alteraciones de los ganglios basales, especialmente del sistema nigroestriado, y propia de la Enfermedad de Parkinson.

Diaforesis: también llamado Hiperhidrosis. Afección por la cual una persona suda demasiado y de manera impredecible. Las personas con hiperhidrosis pueden sudar incluso cuando la temperatura es fresca o cuando están en reposo.

Diplopía: alteración de la visión que consiste en la percepción de dos imágenes de un mismo objeto.

Disartria: alteración del habla provocada por parálisis, debilidad o incoordinación de la musculatura del habla, de origen neurológico.

Disfagia: dificultad para tragar, el proceso de mover los alimentos o los líquidos de la boca al estómago requiere más tiempo y esfuerzo. La disfagia también puede estar asociada a dolor.

Dispositivo: aparato o mecanismo que desarrolla determinadas acciones para obtener un resultado.

Efecto Hall: principio de interacción entre campos magnéticos y cargas eléctricas, diferencia de potencial en un material conductor o semiconductor al ser atravesado por un campo magnético.

Enfermedad de Wilson: trastorno hereditario que causa que haya demasiado cobre en los tejidos del cuerpo. El exceso de cobre causa daño al hígado y al sistema nervioso.

Hipercinesia: aumento patológico de los movimientos involuntarios, que aparece en diversas enfermedades tanto psiquiátricas como neurológicas. Puede manifestarse de forma inespecífica o bien respondiendo a determinados patrones, como en el caso de las convulsiones, temblores, tics, etc.

Hipomimia: disminución o ausencia de la expresión mímica, tanto en gestos como en movimientos, que acompaña a ciertos trastornos psicopatológicos, especialmente a los que cursan con estados depresivos.

Hipotensión ortostática: también llamada hipotensión postural. Forma de presión arterial baja que se produce cuando se pone de pie tras estar sentado o acostado. La persona puede sentirse mareada o aturdida, e incluso puede desmayarse.

Movimiento coreiforme: movimiento involuntario, rápido e irregular que afecta a uno o más segmentos de cuerpo. Interrumpe el movimiento voluntario y cambia los patrones típicos. Se asocia con hipotonía (disminución del tono muscular o tonicidad de un órgano), y reflejos de péndulo.

Neurodegenerativo: perteneciente o relativo a la degradación de las funciones neuronales.

Open hardware: hace referencia a las especificaciones de diseño de un objeto físico que están autorizadas de tal manera que cualquier persona puede estudiar, modificar, crear y distribuir dicho objeto.

Open source: modelo de desarrollo para la creación de programas informáticos, productos o iniciativas de código abierto, adoptan los principios del intercambio abierto, la participación colaborativa, la creación rápida de prototipos, la transparencia, la meritocracia y el desarrollo orientado a la comunidad.

Parálisis Supranuclear Progresiva: enfermedad cerebral poco frecuente, la cual afecta las células del cerebro que controlan el movimiento de los ojos.

Parkinsonismo secundario: síntomas similares al mal de Parkinson causados por ciertos medicamentos, un trastorno diferente del sistema nervioso u otra enfermedad.

Patología: parte de la medicina que estudia las enfermedades. Enfermedad sintomática.

Patrón: modelo que sirve como prototipo para la creación de más modelos estandarizados.

Periférico: en informática, cada uno de los elementos externos de un sistema informático que permiten la entrada o salida de datos.

Sensor: dispositivo que detecta acciones o estímulos externos y responde en consecuencia.

Sialorrea: también conocida como ptialismo o hypersalivación. Trastorno en que se segrega una excesiva cantidad de saliva.

Síndrome Shy-Drager: patología que se asemeja al Parkinson donde se produce una atrofia multisistémica y afectación del sistema nervioso autónomo.

Trastorno: alteración en las condiciones consideradas normales en un objeto, proceso u organismo.

Introducción

La Enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno degenerativo del sistema nervioso central. El segundo más común según la Organización Mundial de la Salud (OMS). Suele manifestarse en personas de avanzada edad y se caracteriza a grandes rasgos por: temblores, rigidez muscular y lentitud de movimiento. Hasta el momento en que se suscribe el presente documento, no existe un análisis específico e infalible para diagnosticar la EP. El diagnóstico se basa en la historia clínica del paciente, un examen neurológico, una exploración física y una valoración cualitativa de signos y síntomas.

Algunos síntomas de la EP son evidentes, aun ante ojos inexpertos. No obstante, otros síntomas son difíciles de detectar, incluso para los especialistas. Sumando a lo anterior, la EP suele ser confundida con otros trastornos del movimiento de sintomatología similar. Situación que podría perjudicar la salud del paciente, al asignar un tratamiento incorrecto. En vista de lo expuesto se desarrolló un dispositivo electrónico con la función de medir y registrar señales biológicas del cuerpo humano. La información adquirida serviría para el estudio o la identificación de patrones que puedan asociarse con la enfermedad de Parkinson y mejoren la precisión del diagnóstico. De igual modo, serviría para valorar la evolución de los pacientes diagnosticados y su respuesta a la medicación.

La estructura seleccionada para la ejecución del proyecto fue *Top Breakdown Structure*. Se definieron jerárquicamente las fases, los objetivos, las actividades y los resultados del proyecto.

En el primer capítulo de este documento se describe la problemática identificada, que conlleva a estudiar cuáles son las características que debe tener un dispositivo electrónico para la adquisición de señales asociadas a la enfermedad de Parkinson. En el

segundo capítulo se relaciona el alcance del estudio, a través del objetivo general y los objetivos específicos. En el tercer capítulo se habla sobre la importancia y los beneficios del estudio. En el cuarto capítulo se desarrolla el marco conceptual y de antecedentes; allí se abordan los juicios y los referentes vinculados a la temática trabajada. En el quinto capítulo se desglosa la metodología empleada, especificando las fases y actividades programadas para la ejecución organizada del proyecto. En el sexto capítulo se establecen los precedentes para la búsqueda en bases de datos de consulta especializada y el análisis de la literatura. El séptimo capítulo se fundamenta en la construcción del dispositivo electrónico, sus componentes, hardware y software. El octavo capítulo consta de las pruebas de funcionamiento y el análisis de los datos resultantes. El noveno y último capítulo cierra el documento con las conclusiones y los trabajos futuros.

1. Planteamiento

La Enfermedad de Parkinson (EP) es un tipo de trastorno del movimiento ligado a una condición neurodegenerativa. Se caracteriza por temblor, rigidez, lentitud en los movimientos e inestabilidad postural (Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos y Accidentes Cerebrovasculares NIH, 2017). Actualmente, no hay evidencia suficiente de pruebas o exámenes médicos que ayuden a diagnosticar esta enfermedad, de manera certera y eficaz.

El diagnóstico de la EP se basa en la historia clínica del paciente, un examen neurológico, una exploración física y una valoración cualitativa de signos y síntomas (como la escala MDS-UPDRS). Algunos médicos suelen solicitar electroencefalogramas, pruebas de diagnóstico por imágenes y otras exploraciones complementarias, para confirmar o descartar enfermedades concretas que causan señales y síntomas similares a los de la EP. Aun así, la EP puede confundirse con varios trastornos del movimiento (National Institute of Neurological Disorders and Stroke NIH, National Institutes of Health, 2016). Tales como el Síndrome Shy-Drager (atrofia sistémica múltiple), la Enfermedad de Wilson, la Parálisis Supranuclear Progresiva y el Parkinsonismo Secundario (CuidatePlus, 2017). En consecuencia, se presentan limitaciones o dificultades en el diagnóstico del paciente y en el tratamiento de su enfermedad.

La EP es una patología detectada de forma sintomática, la precisión del diagnóstico mejorará a medida que aumente el número de variables o síntomas en consideración. En este contexto se plantea el siguiente interrogante: ¿Cuáles son las características que debe tener un dispositivo electrónico para la adquisición de señales asociadas a la Enfermedad de Parkinson?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar un dispositivo electrónico para la adquisición de señales asociadas a la Enfermedad de Parkinson (EP).

2.2. Objetivos específicos

- Determinar el estado actual de los dispositivos electrónicos utilizados para la detección y tratamiento de la EP.
- Caracterizar las señales biológicas de la EP que medirá el dispositivo electrónico.
- Diseñar el hardware y software del dispositivo electrónico conforme a las señales y los síntomas seleccionados.
- Realizar pruebas para evaluar el funcionamiento del dispositivo electrónico diseñado.

3. Justificación

La European Parkinson's Disease Association (EPDA) (s.f.) indica que la Enfermedad de Parkinson (EP) afecta alrededor de 6.2 millones de personas en el mundo. De igual manera, esta asociación señala que los síntomas de la EP varían de persona a persona. Algunos casos son confirmados rápidamente, mientras otros demoran meses o años. Incluso, se suele suministrar medicación para observar la respuesta del paciente y confirmar la enfermedad.

El presente trabajo propone el desarrollo de un dispositivo electrónico para la adquisición de señales asociadas a la EP. El dispositivo medirá y registrará valores “instantáneos” de diversas magnitudes físicas (aceleración, velocidad angular, temperatura, pulso cardíaco) en el cuerpo del paciente. Las magnitudes se relacionan con algunos síntomas de la EP, lo que puede contribuir a la generación de un diagnóstico más preciso, rápido y confiable, derivado del análisis del conjunto de datos obtenidos por el dispositivo.

Se destaca que el dispositivo electrónico se complementa con una interfaz gráfica, donde se visualizarán los datos obtenidos. La interfaz contará con configuraciones que permitan observar en detalle cada señal adquirida. Los resultados provenientes del desarrollo del dispositivo y su interfaz podrán ser materia de análisis en la investigación de posibles mejoras, tanto en el tratamiento de la EP, como en la disminución de la incertidumbre en su diferenciación de otros trastornos del movimiento.

El proyecto favorece a pacientes con EP y a la comunidad médica dedicada al manejo de esta enfermedad. Dado que el dispositivo podría agilizar y sistematizar los procesos efectuados para el diagnóstico y seguimiento de la EP. De igual modo, otro

beneficiario será la comunidad académica y científica en general, puesto que el trabajo servirá de referente a futuros proyectos en el área de estudio.

Sumando a lo anterior la investigación y sus resultados son escalables.

Posteriormente podrían establecerse patrones de comportamiento de la EP, mediante el registro de más señales y síntomas característicos. Se puede llegar a conocer en mayor medida la sintomatología de la EP. Adicionalmente, el dispositivo electrónico podría ser modificado para uso hospitalario.

4. Marco teórico y estado del arte

De acuerdo con el trabajo de (Chaudhuri et al., 2010) los trastornos del movimiento pertenecen a un grupo complejo de enfermedades neurológicas que pueden estar caracterizadas por la pérdida de velocidad en los movimientos (bradicinesia), o por movimientos involuntarios excesivos (hipercinesia). En el espectro de los trastornos de movimiento, existe una amplia gama de presentación clínica, relacionada de manera directa con la topografía de los sistemas comprometidos, asociados con la funcionalidad de los sistemas encargados del control de los movimientos.

Desde el punto de vista anatómico y funcional se puede decir que los trastornos del movimiento se relacionan con la integridad de dos grandes sistemas: el piramidal y el extrapiramidal. El primero subyugado de manera permanente el control de la corteza cerebral (voluntario) y el segundo dependiente de estructuras corticales complementarias y subcorticales que adecuan el movimiento ante una tarea determinada.

Los signos motores acompañan a un gran número de enfermedades neurológicas y son piezas claves desde el punto de vista semiológico para el diagnóstico certero de estas alteraciones. Sin embargo, no siempre es fácil y preciso llegar a un diagnóstico final basado en las características del mismo, teniendo en cuenta la intrínseca relación de estos sistemas controladores del movimiento con otros complementarios: como el sensitivo, el límbico y el autonómico. La interacción permanente e inequívoca entre estos sistemas, permite la aparición de signos y síntomas concomitantes, que hacen difícil en un momento dado el diagnóstico diferencial de los trastornos.

El diagnóstico diferencial en los trastornos del movimiento es fundamental, teniendo en cuenta la génesis de cada uno. En resumen, responden a un importante sistema molecular dependiente de las llamadas monoaminas. Dentro de las cuales la dopamina es la más implicada en estas alteraciones y en otras no motoras, como afecto, control de impulsos, motivación, atención, entre otros. El manejo de estos trastornos depende fundamentalmente de la identificación precisa de todos los signos mencionados, que no son fácilmente identificables por el examinador. Aunado al hecho de que con mucha frecuencia coexisten síntomas piramidales y extrapiramidales.

Dentro de los trastornos del movimiento, una de las condiciones neurológicas con mayores repercusiones en la esfera funcional es la Enfermedad de Parkinson (EP), la cual se define como “un proceso crónico y progresivo provocado por la degeneración neuronal en la sustancia negra, lo cual produce una disminución en los niveles de dopamina. Su etiología es desconocida y multifactorial” (Jankovic J, 2014). Se caracteriza por la presencia síntomas típicos motores y no motores: temblor de reposo, bradicinesia, postura encorvada, rigidez y marcha festinante (Adams V. 10 edic. capt 4. 975-976), los cuales afectan de manera importante la funcionalidad de la persona afectada.

Los síntomas no motores (no dopaminérgicos) contribuyen al deterioro funcional de estos pacientes, algunas veces aparecen antes del diagnóstico; de manera segura se manifiestan en algún momento de la enfermedad. Los principales son depresión, constipación, problemas genito-urinarios, dolor y trastornos del sueño, los cuales generalmente pasan desapercibidos y no son el blanco del tratamiento de la enfermedad (Chaudrui K. Healy G., Schapira A. 2006).

Por otro lado existe disfunción autonómica, la cual fluctúa de manera importante en los diferentes estados de la enfermedad, son causa de importante del deterioro funcional y tienen relación directa con los índices de mortalidad en este grupo de personas (Lonneke M. Dagmar V., Johan M. Jacobus V. 2014). Los principales son: cambios en la temperatura corporal, diaforesis y alteración en reflejos cardiovasculares, hipotensión postural, disfunción eréctil e incremento en la frecuencia cardiaca (Goetz C., Lutge W., Tanner C. 1986).

4.1. Epidemiología

En las últimas décadas se ha llamado la atención, sobre el impacto epidemiológico de las patologías neurológicas, incluyendo la EP, después del informe de la Organización mundial de la salud, publicado en su página oficial el día 26 de Agosto de 2008, en la que afirman que estas enfermedades se constituyen en un riesgo epidemiológico verdadero y que “los trastornos neurológicos como el Parkinson, Epilepsia y el Alzheimer, son causa de impedimento y secuelas neurológicas y constituyen un 6% de la carga global de enfermedad”. Se considera a la EP como la segunda enfermedad neurodegenerativa más común en el ser humano después de la Enfermedad de Alzheimer. Estudios europeos y en Norteamérica reportan una prevalencia entre 1% a 2 % en personas mayores de 65 años y de 3% a 5% en mayores de 85. En el año 2013, se calculaba una población mundial afectada con esta enfermedad de 4.000.000 de personas, la cual se espera que aumente progresivamente por el incremento en la expectativa de vida de la población general (Chaná C., Jimenez C., Diaz T., Juri C. 2013). En Colombia se ha descrito una prevalencia de 4,7/1000 habitantes (Pradilla, et al 2003), la cual, a pesar de seguir siendo relativamente

baja con respecto a otras patologías neurológicas, fue nueve veces mayor que la reportada en el año 2003.

4.2. Diagnóstico

El diagnóstico de la EP se basa en criterios clínicos. No existe algún test específico definitivo que lo permita hasta el momento. El diagnóstico debe ser realizado de acuerdo a la presentación clínica de los síntomas motores: temblor de reposo, bradicinesia, rigidez e inestabilidad postural. La presencia de estos síntomas es fundamental para el diagnóstico diferencial de otras formas de parkinsonismo. Otros síntomas motores secundarios presentes incluyen: micrografía, hipomimia, disfagia, disartria, sialorrea, marcha lenta a pequeños pasos, festinación, congelamiento, distonía y reflejo glabellar. Tal como se describió en párrafos anteriores, son frecuentes los síntomas no motores: disfunción autonómica, anormalidades cognitivo-conductuales, trastornos del sueño y alteraciones sensitivas como la anosmia, parestesias y dolor.

Los síntomas cardinales, son la base para el diagnóstico y permiten caracterizarlos de manera específica:

- Temblor: se define como la oscilación rítmica y mecánica de una parte del cuerpo y puede ser caracterizado de acuerdo a la frecuencia (ciclos/segundo), amplitud y forma de la onda. (Gresty M. & Findley L., mencionados por Jankovic J. 1984). Son producto de las descargas sincronizadas de un grupo de unidades motoras. Se clasifican de acuerdo con su fenomenología: temblor de reposo, de acción, postural y de movimiento (de iniciación, de transición y terminal). Desde hace más de dos décadas se ha estudiado el temblor de acuerdo con la frecuencia de aparición y se ha logrado establecer y clasificar de la siguiente manera:

- De 2,5-4 Hz (ciclos/segundo): probablemente originado por disfunción en el cerebelo.
- De 4-4,5 Hz: probablemente secundario Enfermedad de Parkinson (si es postural), o inducido por drogas u originado en núcleo rojo.
- 5-5,7 Hz: probablemente secundario a temblor esencial, enfermedad de Parkinson (si es postural) o inducido por medicamentos (Ácido Valproico).
- 7-12 Hz: fisiológico, inducido por drogas (epinefrina) o metabólico (hipertiroidismo).

De igual manera se ha intentado estudiar el temblor con análisis computarizados, a través del análisis espectral de las ondas para lograr un diagnóstico diferencial. Por otro lado, el análisis por electromiografía ha sido poco útil.

- Rigidez: se describe con una resistencia continua y uniforme de los músculos al estiramiento, se debe a un aumento del tono muscular en grupos musculares agonistas y antagonistas a través de todo al rango de movimiento. A diferencia de la espasticidad, donde suceden los fenómenos contrarios. Puede ser de dos tipos: “plástica”, cuando la resistencia al movimiento pasivo es constante (“lisa”) o en “rueda dentada”, donde se intercala el temblor con la rigidez.
- Bradicinesia: se define como la lentitud en el movimiento voluntario, la cual se mide por tiempo de movimiento, que es el tiempo que se demora un individuo en realizar un movimiento estereotipado. Es la responsable de los signos clínicos de hipomimia, habla monótona, disfagia, dificultades para el balanceo de brazos,

rigidez del tronco al caminar, falta de movimientos asociados cuando realiza cualquier tarea y marcha festinaste (junto con el mal control de tono postural). Se confunde a menudo con el término de congelamiento o “freezing” (Patten J. 1996). Se debe principalmente a mecanismos centrales de planeamiento motor, más que a fenómenos de excitabilidad de las motoneuronas (ejecución motora) (Jankovic, 1993). Este planeamiento motor depende de la integridad de la corteza prefrontal, motor primario, ganglios basales y tálamo, a diferencia de la ejecución motora que depende de otras estructuras (corteza motora, motoneuronas, y músculos, así como a las “referencias” medula-tálamo-cerebelo-corteza).

- Pérdida de reflejos posturales: se define como una pérdida de los reflejos de ajuste postural que acompañan un movimiento voluntario. Parece deberse a una alteración funcional en las referencias del globo pálido, hacia el tálamo y área motora suplementaria, la cual es importante en la coordinación y preparación motora. Gelb, D., Oliver E. y Gilman S (1999).

Los estudios de imagenología como la Escanografía y la resonancia son útiles para hacer diagnóstico diferencial con otras formas de parkinsonismo. Recientemente se han propuesto el uso de biomarcadores (10-15 proteínas) para mejorar el diagnóstico y seguimiento de esta enfermedad (Liu B., Swanson C., Rick J., Weintraub D., Hurtig H., Trojanowski J. y Chen-Plotkin A. 2014).

La evolución de la enfermedad es muy tórpida y progresiva, con empeoramiento progresivo de los síntomas motores y la discapacidad. Existen varios datos que sugieren mal pronóstico en los pacientes con EP: edad, edad de comienzo de los síntomas, además de los síntomas indicadores de compromiso no-dopaminérgico. Estos síntomas indican

pobre respuesta al tratamiento de los síntomas motores y progresión de la discapacidad. La edad de inicio para ser el principal factor pronóstico, sugiriendo que la edad temprana es de mejor pronóstico en este grupo de pacientes (Alves G., Wentzel-Larsen T., Aarsland D. y Larsen J. 2005).

La presencia de varios síntomas en las etapas tempranas de la enfermedad, como la ausencia de temblor de reposo, trastornos de marcha, inestabilidad postural, signos de disfunción autonómica, oftalmoparesia, alucinaciones, demencia y pobre respuesta al tratamiento con L-Dopa, hacen pensar en un diagnóstico diferente al de EP (Jankovic, 2008). Los biomarcadores, utilizados en las dos últimas décadas, permiten hacer diagnóstico diferencial en algunos casos y la tipificación genética permite confirmar los mismos.

4.3. Fisiopatología

La EP se caracteriza por la pérdida progresiva de neuronas productoras de Dopamina, por mecanismos degenerativos y/o inflamatorios no bien definidos, con una clara e identificada influencia e interacción genética y ambiental.

En los estudios histopatológicos de los pacientes con EP, se observa la presencia de inclusiones citoplasmáticas neuronales (Cuerpos y Neuritas de Lewy), compuestas por la proteína alfa-sinucleína y en algunos casos específicos por la Parkina en los neurofilamentos alterados estructuralmente; estas aparecen siempre que hay pérdida neuronal excesiva, en este caso en la sustancia negra (Luk K. 2014). El mecanismo por el cual se da la pérdida neuronal es desconocido hasta el momento. Sin embargo, se ha demostrado que la presencia de la alfa-sinucleína produce apoptosis solamente en las neuronas Dopaminérgicas (selectivamente), de tal manera que la presencia de la Dopamina

y de especies reactivas de oxígeno, son cofactores importantes para desencadenar la muerte neuronal. La Toxicidad mediada por Dopamina es medida por la presencia de un complejo proteico, que incluye la alfa-sinucleína y proteína 14-3-3, que está incrementado en la sustancia negra en pacientes con EP (Xu J., Kao S., Lee F., Song W., Jin L. Y Yankner B. 2002). La importancia de los cuerpos de Lewy no está muy clara en la EP. Existen ciertos tipos de parkinsonismo secundario y formas de EP familiar en los cuales no están presentes. Además, se encuentran presentes en las autopsias de pacientes con patologías diferentes a la de EP (Exner N., Lutz A., Haass C. Y Winklhofer F. 2012).

Recientemente, han surgido nuevas teorías basadas en estudios genéticos, que demuestran alteraciones mitocondriales implicadas en la disfunción y degeneración neuronal observadas en la EP. Hay suficiente evidencia de que la disfunción mitocondrial es un factor común en la EP esporádica y familiar, parece ser más importante que el estrés oxidativo en la muerte neuronal (Exner N. Et al. 2012).

4.4. Tratamiento y seguimiento

Teniendo en cuenta que la EP se debe a una pérdida de neuronas productoras de Dopamina, principalmente, el tratamiento se basa en tratar de regular dicho sistema dopaminérgico. Sin embargo, otros sistemas de neurotransmisión diferentes al descrito están implicados en otros síntomas no cardinales de la enfermedad y en las comorbilidades presentes frecuentemente (Jankovic y Tolosa 1993), tales como:

- Acetilcolina y Noradrenalina: implicados en la aparición de Demencia (1/3 de los pacientes con EP).
- Serotonina: depresión, frecuente en más de un 30 %.

- Noradrenalina: depresión y fenómeno de congelamiento (bloqueo motor), observados durante el tratamiento en algunos pacientes.
- Fascículo intermedio lateral (tallo cerebral y médula), Núcleo dorsal del Vago (X par craneal) e Hipotálamo (disfunción autonómica).
- Sistema dopaminérgico descendente di encefálico-medular: dolor

El tratamiento sintomático va dirigido a manejar los síntomas cardinales de la enfermedad, que producen importante compromiso funcional:

- Temblor de reposo (diferente al temblor de intención o al observado en otras patologías)
- Bradicinesia (lentitud de movimientos).
- Incremento del tono muscular (extra piramidal) denominada Rigidez en rueda dentada (diferente a la espasticidad, dada por incremento del tono muscular secundaria a compromiso de la vía piramidal: “en fuelle de navaja)
- Inestabilidad postural dada por pérdida de reflejos de control de postura.

4.4.1. Farmacoterapia

En la actualidad no es posible recomendar un tratamiento de primera línea y la elección del mismo debe ser realizada teniendo en cuenta varios aspectos como la clínica, estilo de vida del paciente y le elección del paciente. Los más utilizados tempranamente en la enfermedad son los anticolinérgicos, para el manejo sintomático del temblor, sobre todo en personas jóvenes debido al efecto secundario de la Levodopa.

4.4.1.1. Fluctuación motora

No es muy comprendido el mecanismo por el cual se presentan, pero generan importante grado de discapacidad:

- Deterioro de fin de dosis (*wearing off*): dificultad motora marcada que aparece al disminuir el nivel sérico de L-dopa. Puede llegar incluso al fenómeno de congelación.
- Comienzo retardado de respuesta: hay demora en el tiempo de latencia entre la administración de la L-dopa y la mejora motora.
- Resistencia a la droga (*off*): ausencia de respuesta a la L-dopa
- Oscilación al azar (*on-off*): existen periodos alternantes que pueden durar segundos o minutos entre actividad y dificultad motora.
- Congelamiento (*freezing*): ausencia de movimientos dada por marcado incremento generalizado del tono muscular. Se caracteriza por la pérdida de la capacidad de iniciar o continuar un movimiento rítmico repetitivo como hablar, caminar o escribir.

En los periodos “*off*”, se presentan con mayor frecuencia alteraciones neuropsiquiátricas (alucinaciones, ilusiones, apatía o ansiedad), así como diaforesis y disminución de la temperatura corporal. Sin embargo, en el periodo “*on*”, puede aparecer algunas alteraciones como: hiperactividad, desinhibición y verborrea (Lunar M., Peña E. y Gutierrez C. 2003).

4.4.1.2. Diskinesias

Aparecen en el 50% de los pacientes tratados con L-dopa. Algunos los relacionan con la duración del tratamiento, sin embargo, es muy discutido. Se deben a alteraciones en el metabolismo de la L-dopa y/o a la propia farmacocinesia del medicamento. Se presentan como movimientos coreiformes y atetósicos de cara, tronco, cuello y extremidades y tienden a ser muy dolorosas. Aparecen o en la mañana o en la noche generalmente. Los principales son (Gudiri J., Gonzalez-Redondo y Obeso J. 2012):

- Pico de dosis (*on*): se relaciona con altos niveles plasmáticos de Dopa, en paralelo con el máximo beneficio antiparkinsoniano: movimientos coreicos y ocasionalmente distónicos.
- Disfásica: se relaciona con el comienzo y el final del efecto de L-dopa (niveles séricos): movimientos repetitivos y estereotipados lentos de menos de 4 Hz en miembros inferiores asociados a temblor de 4 Hz en Miembros superiores.
- Distonia “*off*”: posturas dolorosas en miembros inferiores y se presenta con los menores niveles de L-dopa.

4.4.2. Terapia física y ocupacional.

Se encuentran dirigidas a la rehabilitación de marcha, mejorar la iniciación de los movimientos, mantener la independencia en actividades de vida diaria y aumentar la capacidad aeróbica. También, a mantener y promover el autocuidado, mantener la movilidad y la funcionalidad laboral y familiar.

4.4.3. Método cualitativo

La escala de clasificación de Hoenn y Yahr, es un método para identificar y comparar pacientes con EP, solo evalúa signos y síntomas de la enfermedad. No es útil para hacer seguimiento y monitoreo. Son fáciles y rápidas de aplicar además de su bajo costo. Se basan en graduar los signos y síntomas y/o la habilidad funcional del paciente. Son fundamentalmente de carácter nominal y en algunos casos contienen ítems objetivos (escalas de intervalos), como: tiempo para caminar una distancia fija, para escribir una frase o leer un artículo y para hacer movimientos con las extremidades. (Jankovic y Tolosa 1993, citando a Schwab, 1960). Las escalas más utilizadas son las Hoenn y Yhar (1967) y la UPDRS (Unified Parkinson's Disease Rating Scale. Fahn et al, 1987).

La escala UPDRS, es la ampliamente utilizada en el mundo. Evalúa signos y síntomas, además de funcionalidad: temblor, rigidez, bradicinesia, marcha, expresión facial, postura, estabilidad postural, destreza en los dedos, lenguaje, test de la silla, actividades de la vida diaria (AVD): caminar, vestir, hablar, comer, bañar y comorbilidades: demencia, depresión, seborrea, funcionalidad social y movimientos asociados. A pesar de tener buena confiabilidad y validez, tiene algunas limitaciones en las instrucciones a los aplicadores, problemas métricos y ausencia de preguntas de selección múltiple de varios aspectos de la enfermedad (movement disorder society task force. 2003).

4.4.4. Método Cuantitativo

Se trata de métodos sofisticados de imágenes y de identificación de biomarcadores, que por su alto costo y dificultad en su aplicación no se utilizan de manera usual para hacer seguimiento.

Uno de los objetivos del tratamiento en los últimos años, ha sido el disminuir la neuro-degeneración subyacente al trastorno. Por lo tanto, se han incrementado los esfuerzos por encontrar biomarcadores que demuestran cambios en la tasa de progresión de la enfermedad con el tratamiento específico. La mayoría de estos métodos utilizan un radio-marcador que mide la función Dopaminérgica en el sistema nigro-estriado, con resultados muy contradictorios. Se han realizado muchos estudios del metabolismo específico de áreas cerebrales en enfermedades neurodegenerativas, especialmente relacionadas con el control motor (sistema nigro-estriado), utilizando PET, con F-fluorodeoxyglucosa (Morrish O., Rakshi J., Bailey D., Sawle G. 1998). Este método ha permitido caracterizar un patrón de hallazgos cognitivos y motores en la enfermedad de Parkinson, demostrando que el tratamiento con L-dopa mejora la función motora, pero no la cognitiva (Brooks D., Frey C., Marek K., Oakes D., Paty D., Prentice R., Shults C. y Stoessl A. 2007).

4.5. Tecnologías desarrolladas

De manera general, a nivel mundial se han desarrollado propuestas y proyectos tecnológicos encaminados a identificar o tratar la EP. Palmeniri, Rocchi, Mellone, Valzania, & Chiari (2011) evaluaron la viabilidad de usar acelerómetros para analizar el comportamiento postural de personas con temprana EP. En el sistema de medida se usó un acelerómetro triaxial, McRoberts DynaPort MICROMOD, con frecuencia de muestreo de 100 Hz, rango de ± 2 g y resolución de 1 mg. El sistema se probó en 20 sujetos con EP y 20 sujetos de control, quienes vestían el acelerómetro en la espalda baja por medio de una correa de cintura elástica; en total se computaron 175 medidas. Se utilizó Matlab R2009b para el procesamiento de la señal, el cálculo de la medida postural, el procedimiento de clasificación y análisis estadístico.

El estudio realizado por Tripoliti y otros (2013), fue desarrollado con el objetivo de detectar la congelación de la marcha, un evento en pacientes que sufren la (EP). Para conseguirlo, usaron señales recibidas de sensores portátiles colocados en el cuerpo de los pacientes. El estudio se desarrolló en cuatro etapas y analizó: los valores perdidos por degradación de la señal; los componentes de baja frecuencia de la señal y la entropía de la señal. Se evaluaron diversas configuraciones de sensores para producir la detección óptima del episodio niebla.

Fazio y otros (2013) realizaron en el mismo año estudios de recepción de señales. Su propósito era evaluar variables acelerométricas de la marcha en diferentes condiciones neurológicas. Teniendo en cuenta la marcha patológica con deterioro en comparación con sujetos sanos. Se experimentó con 17 pacientes afectados por la Enfermedad de Parkinson, 24 con marcha atáxica debido a diferentes enfermedades y 24 sujetos sanos. El acelerómetro con tres ejes, mide la aceleración y deceleración en anterior-posterior, plano medio lateral y vertical en un nivel aproximado del centro de masa y en otras dos posiciones durante el caminar.

También en el 2013, la Comunidad de Madrid, el Instituto Tecnológico de Massachusetts – MIT, el Hospital Universitario 12 de Octubre, el Hospital Clínico San Carlos, el Massachusetts General Hospital de Boston y la Harvard Medical School comenzaron un proyecto multidisciplinar e internacional, denominado “NeuroQWERTY”. El objetivo de la iniciativa fue proporcionar soporte tecnológico al diagnóstico de la EP, mediante el registro de la habilidad motriz de las personas mayores en riesgo de padecer Párkinson, al escribir un correo electrónico o mensaje de texto. Para ello, diseñaron un software que lleva el mismo nombre del proyecto y se instala en el smartphones, tablets o

computadores personales. Durante el uso de los dispositivos mencionados, la aplicación proporciona información biomédica del paciente y detecta los cambios que se desvían de la normalidad (Comunidad de Madrid, 2015).

LeMoyne, Mastroianni, & Grundfest (2013) identificaron la posibilidad de mejorar la calidad de la atención en los pacientes con EP, a través de aplicaciones inalámbricas de seguimiento. Así que implementaron la arquitectura de un acelerómetro inalámbrico para cuantificar el temblor de la mano, causado por la EP. El sistema construido hace uso de nodos acelerómetros inalámbricos G-Link. La forma de onda de la aceleración generada por el temblor se puede grabar y almacenar para post procesado y seguimiento de estado progresivo. En las pruebas de ingeniería del dispositivo se registró la aceleración de la simulación del temblor en la mano y se comparó con la aceleración con la mano estática.

En el 2015 el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) desarrolló un lápiz que ayuda a detectar el Alzheimer y el Parkinson. Este instrumento posee un software capaz de diagnosticar si el paciente padece o alguna condición neurodegenerativa gracias a un procedimiento conocido como *clock-drawing test*. Consiste en que el paciente dibuje a mano alzada la esfera de un reloj y que además ponga las manecillas en la hora que se le indique, lo cual permite a los médicos saber con diez años de anticipación si el paciente es propenso o no a dichas enfermedades (La Prensa, 2015).

4.6. Sensores de movimiento

Para la medición de un temblor se deben tener en cuenta 2 parámetros: amplitud y frecuencia. Para tal fin se deben utilizar sensores de movimiento que cuantifican el temblor. Conocida la posición de un determinado objeto, es posible determinar la velocidad y la aceleración mediante derivadas de primer y segundo orden, respectivamente. Debido a esta

relación entre posición y aceleración, se establece como forma primaria de sensor de movimiento el acelerómetro.

En general se trata de un dispositivo diseñado para medir la tasa de cambio de la posición, ubicación o desplazamiento con respecto al tiempo de un objeto. Se utiliza para determinar la aceleración de sistemas, tanto en reposo como en movimiento. Midiendo la aceleración es posible obtener las funciones de velocidad y posición. Los tipos de acelerómetros que se pueden encontrar son los siguientes: capacitivo, piezo-eléctrico, piezo-resistivo, de Efecto Hall, magneto-resistivos y de transferencia de calor.

4.7. Ruido en señales biológicas

La medición de señales, en especial las biomédicas, se ve deteriorada por el ruido de los sistemas. Los tipos de ruido que se pueden encontrar en un sistema de medición biomédico son los siguientes: ruido de baja frecuencia, ruido inherente. Por otro lado, siempre es común encontrar señales de interferencia, que, si bien no son de ruido propiamente dicho, afectan notablemente la medición. El ruido es un problema que tiene distintas causas y se debe solucionar (Gray and R. Meyer, 1993). Para tal fin se suelen utilizar filtros pasa altos con frecuencias de corte inferior por encima de la banda del ruido de baja frecuencia, y frecuencia de corte superior por debajo de la banda del ruido inherente a la señal biológica que se está midiendo. Para la anulación de la interferencia es típico el uso de amplificadores de instrumentación (o diferenciales). Este tipo de dispositivo amplifica la diferencia de las señales en sus entradas y rechaza cualquier señal común, como son las interferencias. A esta propiedad se le llama Rechazo en Modo Común (CMRR) (Franco, 2002).

El concepto de sensor es equivalente a las nociones de sonda y transmisor. Los sensores convierten una magnitud física o química en una magnitud eléctrica. Los sensores “constituyen el primer y más importante eslabón de la cadena de información, decisión y acción, ya que si su aportación es deficiente, las siguientes etapas se desarrollarán por caminos erróneos” (Pérez Conde, 1996).

5. Metodología

El presente estudio respalda el desarrollo estructural de un equipo electrónico capaz de centralizar información adquirida. Además, se constituye como una investigación con enfoque cualitativo, al aplicar la lógica inductiva y extraer significados de los datos estudiados. Igualmente, la investigación tiene un alcance descriptivo. Debido a que la arquitectura del dispositivo electrónico es descrita por los elementos que la conforman, tales como sensores, indicadores y microcontrolador. Considerando así, el fenómeno estudiado, sus componentes y la definición de variables.

La metodología del presente estudio se divide en tres fases asociadas a objetivos específicos, actividades y resultados, agrupados todos en la tabla 1. Cada fase se estructura como un capítulo en la monografía, mientras las actividades son subcapítulos desarrollados.

Tabla 1.

Metodología del proyecto

Fases	Objetivo	N°	Actividad	Resultados
Análisis bibliográfico de la literatura	Determinar el estado actual de los dispositivos electrónicos utilizados para la detección y tratamiento de la Enfermedad de Parkinson (EP)	1	Establecer las palabras claves de la revisión de la literatura	Cadenas de búsqueda de artículos Documentación estado del arte
		2	Determinar las fuentes de consulta	
		3	Crear las cadenas de búsqueda	
		4	Realizar una selección de artículos científicos sobre la temática	
		5	Clasificar y documentar la información más relevante sobre la temática	
Construcción dispositivo electrónico	Caracterizar las señales biológicas de la EP que medirá el dispositivo electrónico	1	Definir las señales y síntomas que medirá el dispositivo electrónico	Documentación de señales seleccionadas
		2	Describir las señales y síntomas seleccionados	Especificaciones técnicas de los sensores del dispositivo electrónico
		3	Seleccionar los sensores y el microcontrolador del dispositivo electrónico	

Fases	Objetivo	Nº	Actividad	Resultados
	Diseñar el hardware y software del dispositivo electrónico conforme a las señales y los síntomas seleccionados.	1	Diagramar la estructura y el algoritmo del dispositivo electrónico	Selección de herramientas Diseño de arquitectura Un hardware Un Software
		2	Seleccionar las herramientas para el diseño del circuito, la interfaz gráfica, y el código fuente	
		3	Diseñar circuito esquemático e impreso	
		4	Generar código fuente	
		5	Diseñar interfaz gráfica	
		6	Fabricar el hardware del dispositivo	
Puesta a punto	Realizar pruebas de validación de funcionamiento del dispositivo electrónico.	1	Seleccionar la muestra	Selección de la muestra Información adquirida con el dispositivo Monografía
		2	Probar el dispositivo electrónico en una muestra de personas con y sin Enfermedad de Parkinson	
		2	Analizar los resultados de todas las pruebas	
		3	Documentar monografía.	

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Como se observa en la tabla 1, la primera fase del estudio corresponde al análisis bibliográfico de la literatura y pretende establecer los antecedentes de la investigación. En otras palabras, conocer que dispositivos para el diagnóstico de la Enfermedad de Parkinson (EP) se han propuesto previamente y como han abordado el problema otros investigadores. Desarrollar las actividades de la fase trae como resultado: las cadenas de búsqueda y la documentación del estado del arte.

La segunda fase del estudio abarca dos objetivos y todo lo concerniente a la construcción del dispositivo electrónico. Desde la concepción de sus entradas y componentes, hasta la fabricación de hardware y software con la ayuda de algunas herramientas. Las actividades de esta fase conllevan a los siguientes resultados: la documentación de señales y síntomas seleccionados, las especificaciones técnicas de los

sensores del dispositivo electrónico, la selección de herramientas, el diseño arquitectura, el hardware y el software del dispositivo.

La tercera y última fase del estudio es la puesta a punto del dispositivo electrónico. Su finalidad es corroborar que el dispositivo está dispuesto para uso, cumpliendo con la función planteada. Para ello se prueba y evalúa en un grupo específico de personas. De esta fase resulta: la selección de la muestra, la información adquirida con el dispositivo y la presente monografía.

6. Análisis bibliográfico de la literatura

El objetivo de la fase análisis bibliográfico de la literatura es determinar el estado actual de los dispositivos electrónicos utilizados para la detección y tratamiento de la Enfermedad del Parkinson (EP), en un contexto global. A continuación, se detalla la metodología y resultados de esta fase:

6.1. Palabras clave

El primer paso fue determinar las palabras claves. Para ello se tuvo en cuenta el título del proyecto “Dispositivo electrónico para la adquisición de señales asociadas a la enfermedad de parkinson (EP)”, seleccionando los siguientes términos:

En español:

- Enfermedad del Parkinson
- Acelerómetro
- Parkinsonismo
- Detección de movimiento
- Señales biológicas

En inglés:

- *Parkinson disease*
- *Acelerometer*
- *Parkinsonism*
- *Movement deteccion*
- *Biological signals*

6.2. Fuentes de consulta

Después de establecer las palabras claves se procedió a determinar las fuentes de consulta, seleccionando las siguientes bases de datos de consulta especializada: IEEE Xplore, Medline, Medbase, Nature Nanotechnology, Taylor & Francis Online, Springer y Science Direct. También se seleccionó el meta buscador Google Scholar, porque tiene la capacidad de re-direccionar las búsquedas a revistas especializadas en la temática de estudio. La revisión se realizó en una ventana de tiempo comprendida entre los años 2010 a 2017.

6.3. Cadenas de búsqueda

A continuación se relaciona la cadena de búsqueda en español establecida para este estudio:

(“Parkinson” OR “Parkinsonismo” OR “Trastorno del movimiento”)

AND

(“Hardware” OR “Tecnología” OR “Sensor” OR “Detector” OR “Dispositivo” OR “Sistema embebido” OR “Circuito”)

AND

(“Sudoración” OR “Hiperhidrosis” OR “Capacidades grafomotoras” OR “Escritura” OR “Lentitud en movimientos” OR “Bradicinesia” OR “Alteraciones biológicas” OR “Alteraciones neurológicas” OR “Alteraciones de la Voz” OR “Hipofonia” OR “Disartrias” OR “Temblor” OR “Movimiento” OR “Equilibrio” OR “Riesgo de caída” OR “Marcha” OR “Discinesia” OR “Postura” OR “Hipomimia” OR “Hiposmia” OR “Anosmia” OR “Respuesta electrodérmica” OR “disautonomía” OR “marcadores somáticos” OR “Mini-examen cognoscitivo” OR “MEC” OR “UPDRS”

OR “Diagnóstico temprano” OR “Levodopa” OR “Acelerómetro” OR “Giroscopios”
 OR “Inerciales” OR “Celular” OR “Teléfono móvil” OR “Dinamómetro” OR
 “Biofeedback” OR “Cuerpo Fijo” OR “Ropa inteligente” OR “Usable” OR “lucible”
 OR “Inalámbrico” OR “Multiparamétrico”)

Asimismo se estableció una cadena de búsqueda en inglés para este estudio:

(“Parkinson” OR “paralysis agitans” OR “Parkinsonism” OR “shaking palsy” OR
 “Movement Disorders”)

AND

(“Hardware” OR “electronic component” OR “Technology” OR “Sensor” OR
 “detector” OR “transceiver” OR “device” OR “Embedded System” OR “circuit”)

AND

(“sweating” OR “sweat” OR “perspiration” OR “perspire” OR “hyperhidrosis” OR
 “graphomotor capabilities” OR “Writing” OR “handwriting” OR “script” OR
 “manuscription” OR “Slow movements” OR “Bradykinesia” OR “biological
 alterations” OR “biological difference” OR “biological disorders” OR “neurological
 disorders” OR “neurological alterations” OR “neurological difference” OR “Voice
 Disorders” OR “voice alterations” OR “voice difference” OR “dysarthria” OR
 “hypophonia” OR “Tremor” OR “vibration” OR “Motion” OR “movement disorder”
 OR “Balance” OR “Fall Risk” OR “Walking” OR “marching” OR “Freezing of gait”
 OR “Dyskinesia” OR “Posture” OR “hypomimia” OR “hyposmia” OR “Anosmia”
 OR “pose” OR “posture” OR “electrodermal response” OR “dysautonomia” OR
 “somatic marker” OR “Mini-mental state examination” OR “MMSE” OR “Unified
 Parkinson's Disease Rating Scale” OR “UPDRS” OR “Early Diagnosis” OR “l-dopa”

OR “levodopa” OR “Accelerometer” OR “Gyroscope” OR “Inertials” OR “Cell Phone” OR “Mobile Phones” OR “dynamometer” OR “Biofeedback” OR “Body Fixed” OR “Smart Clothes” OR “Wearable” OR “Wireless” OR “tele-transmission” OR “Multi-parametric” OR “biometric”).

6.4. Selección de artículos

Se seleccionaron y descargaron aquellos artículos que cumplieran los criterios de inclusión y exclusión. Los criterios contemplados fueron las siguientes: (1) estar escritos en español o inglés; (2) estar relacionados con la Enfermedad de Parkinson; (3) emplear tecnología de hardware: sensores, dispositivos de control y adquisición u otra electrónica. Los artículos escogidos se consolidaron en un archivo de Excel, a manera de una matriz de papers; la tabla 2 es un fragmento de la matriz.

Tabla 2.

Matriz de papers

Autores	Título	Año	País	Revista	Base de datos	DOI	Resumen
Palmerini, Luca Rocchi, Laura Mellone, Sabato Valzania, Franco Chiari, Lorenzo	Feature Selection for Accelerometer-Based Posture Analysis in Parkinson's Disease	2011	Italia	IEEE Transactions On Information Technology In Biomedicine	IEEE Explore		El objetivo del estudio fue evaluar la viabilidad del uso de acelerómetros para caracterizar el comportamiento postural de los sujetos tempranos con EP leve.
Whitney, S. L. Roche, J. L. Marchetti, G. F. Lin, C. C. Steed, D. P. Furman, G. R. Musolino, M. C. Redfern, M. S.	A comparison of accelerometry and center of pressure measures during computerized dynamic	2011	EEUU	Gait & Posture	Science Direct	10.1016/j.gaitpost.2011.01.015	El propósito del estudio fue estimar la confiabilidad test-retest de las medidas de acelerometría (ACC) y determinar la relación entre el ACC medida en la pelvis y las medidas del centro de presión (COP) bajo los pies,

Autores	Título	Año	País	Revista	Base de datos	DOI	Resumen
	posturography: A measure of balance						durante las condiciones de prueba de organización sensorial (SOT).
Scanlon, Blake K. Levin, Bonnie E. Nation, Daniel A. Katzen, Heather L. Guevara-Salcedo, Alexandra Singer, Carlos Papapetropoulos, Spiridon	An accelerometer-based study of lower and upper limb tremor in Parkinson's disease	2013	EEUU	Journal of Clinical Neuroscience	Science Direct	10.1016/j.jocn.2012.06.015	El objetivo del estudio fue investigar las propiedades del movimiento oscilatorio, en reposo y en postura, en los miembros superiores e inferiores de pacientes con enfermedad de Parkinson (EP), clínicamente indetectable en reposo moderado/temblor postural y controles sanos.
Mancini, Martina Salarian, Arash Carlson-Kuhta, Patricia Zampieri, Cris King, Laurie Chiari, Lorenzo Horak, Fay B.	ISway: A sensitive, valid and reliable measure of postural control	2012	EEUU	Journal Of Neuroengineering And Rehabilitation	BMC	10.1186/1743-0003-9-59	El propósito del estudio fue desarrollar una prueba instrumentada de balanceo postural (ISway) usando un acelerómetro para ofrecer una medida objetiva y práctica del control postural.

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En la tabla anterior se evidencia que en la matriz de papers se sintetizaron los datos más relevantes como el nombre del artículo y de la revista, los autores, la fecha y el país de publicación, el DOI y el resumen.

6.5. Clasificación y documentación de la información

La clasificación se realizó a partir de la información en la matriz de papers. A cada artículo se le asignó un código para identificar la temática con la que se relaciona.

Seguidamente se analizaron y documentaron algunos artículos en el capítulo Marco teórico y estado del arte del presente documento.

7. Construcción del dispositivo electrónico

La finalidad de la fase construcción del dispositivo electrónico es caracterizar señales biológicas asociadas a la Enfermedad del Parkinson (EP), así como desarrollar el software y el hardware. A continuación, se detalla la metodología y resultados de esta fase:

7.1. Caracterización de las señales biológicas

7.1.1. Señales y síntomas de la Enfermedad de Parkinson

Por ser un trastorno del movimiento, las señales y síntomas más conocidos o más mencionados de la EP son motores. Principalmente temblores, problemas con el movimiento, rigidez o problemas de equilibrio (National Institute of Neurological Disorders and Stroke NIH, National Institutes of Health, 2016). A pesar de ello, existen señales y síntomas no motores fuertemente asociados a la EP (Merello, 2008). Tales como cambios en la temperatura corporal, diaforesis y alteración en reflejos cardiovasculares, hipotensión postural, disfunción eréctil e incremento en la frecuencia cardíaca (Goetz C., Lutge W., Tanner C. 1986). De hecho, la escala MDS-UPDRS (Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale), empleada comúnmente en el estudio clínico de la EP, evalúa en el paciente señales y síntomas, tanto motores como no motores (Goetz, y otros, 2008). A continuación, se abordan con más detalle señales y síntomas de la EP.

7.1.1.1. Señales y síntomas motores

Son los relacionados con alteraciones o dificultades que afectan el movimiento. La escala MDS-UPDRS valora las señales y los síntomas siguientes: temblor, bradicinesia, rigidez, problemas para hablar, problemas en la masticación o deglución, problemas para el desarrollo de actividades (comer, vestirse, higiene, escritura, hobbies), problemas para

variar la posición (darse vuelta en la cama, levantarse de la cama o de un asiento), dificultad mantener el equilibrio, congelaciones o bloqueos al caminar, hipomimia, movimientos anormales e involuntarios (Goetz, y otros, 2008). Rodríguez Pupo, Díaz Rojas, Rojas Rodríguez, Ricardo Rodríguez y Aguilera Rodríguez (2013), afirman que el temblor es “el síntoma más frecuente y fácilmente reconocible de la EP, síntoma inicial en el 70% de los casos”.

7.1.1.2. Señales y síntomas no motores

De acuerdo con Simón Pérez, Aguilera Pacheco, Núñez Lahera, & Colina Avila (2017) los síntomas no motores pueden agruparse en:

- Neuropsiquiátricos. Aquellos relacionados con alteraciones o cambios en el estado de ánimo y/o en la conducta. De este grupo hacen parte los siguientes síntomas: demencia, depresión, ansiedad, psicosis, pérdida de control de los impulsos, disfunción visuoespacial, entre otros. Durante el curso de la enfermedad, se estima que más de la mitad de los pacientes con EP pueden padecer algún cambio emocional, siendo más frecuentes la depresión (50%) y la ansiedad (40%) (Weintraub, 2008).
- Autonómicos. Aquellos relacionados con alteraciones o problemas en las funciones corporales involuntarias, como la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria, la presión arterial, la transpiración, la salivación, la digestión, la evacuación de los intestinos y vejiga, etc. En este grupo se encuentran los siguientes síntomas: hipotensión postural, trastornos gastrointestinales, genitourinarios, diaforesis, sialorrea, alteraciones en la temperatura corporal, alteraciones en los reflejos

cardiovasculares, alteración en la frecuencia cardíaca, entre otros. “La prevalencia de trastornos autonómicos en EP varía de 14 al 80% en distintos estudios y según el criterio utilizado...La hipotensión postural es la manifestación más frecuente, con una incidencia que en general se estima entre 20 y 50%” (Gómez, Hudson, & Venegas, 2011).

- Trastornos del sueño. Aquellos relacionados con problemas o cambios en los patrones y hábitos del sueño. En este grupo se incluyen síntomas como: insomnio, trastorno de conducta en fase REM, síndrome de piernas inquietas, apnea, somnolencia diurna, entre otros. Según el estudio de Simón Pérez, Aguilera Pacheco, Núñez Lahera y Colina Avila (2017), los trastornos del sueño más comunes en pacientes con EP son: el síndrome de las piernas inquietas (50,0 %) y el insomnio (40, 9 %). En cuanto a la somnolencia diurna, puede manifestarse por un trastorno primario del sueño, como la apnea, o por efectos secundarios de medicamentos antiparkinsonianos (Boeve & Silber, 2008).
- Sensitivo – sensoriales. Aquellos relacionados con problemas, variaciones y limitaciones en los sentidos o sistemas sensoriales. A este grupo pertenecen síntomas como: dolor, hormigueo y calambres, alteraciones visuales, alteraciones del gusto, hiposmia, hipoacusia y otros trastornos auditivos, demás asociados. Para Santos-García y otros, (2010) “el dolor es un síntoma muy prevalente e infradiagnosticado en la EP”.
- Otros. Aquellos relacionados con alteraciones no motoras, no asociadas en los anteriores grupos. En este grupo se hallan: fatiga y diplopía. Ambos síntomas son

frecuentes en la EP, la fatiga se presenta del 32 al 50% de los pacientes (Sociedad Iberoamericana de Información Científica SIIC, 2016) y la diplopía del 10 al 38% de los pacientes (in-pacient.es, 2017).

7.1.2. Señales y síntomas a medir

Las señales y los síntomas referidos en el anterior ítem, se hallaron al estudiar la escala MDS-UPDRS y varios artículos científicos. De ese conjunto sintomatológico, se identificaron señales y síntomas característicos, frecuentes y mensurables con dispositivos o componentes electrónicos. Luego se establecieron las entradas o variables de adquisición del dispositivo electrónico. Se definió que el temblor, la bradicinesia y la rigidez son señales y síntomas motores, que podrían analizarse al medir la aceleración triaxial y la velocidad angular triaxial del movimiento. Igualmente, se definió que las alteraciones en la temperatura corporal y las alteraciones en la frecuencia cardíaca son señales y síntomas no motores, que podrían valorarse al medir temperatura y pulso cardíaco, respectivamente. Todas las magnitudes mencionadas pueden captarse con sensores y medirse en las manos.

No se halló evidencia de estudios que precisen una medida o rango de valores sobre las variaciones en la amplitud, velocidad y aceleración del movimiento voluntario, manifestadas en pacientes con EP. Por lo tanto la bradicinesia (lentificación del movimiento) y la rigidez se analizarían desde la comparación, adquiriendo con el dispositivo datos de aceleración y velocidad angular en personas con y sin la EP, bajo condiciones de prueba iguales. En cuanto al movimiento involuntario, se encontró que el temblor “ocurre en reposo a una frecuencia de 4-6 Hz” (Rodríguez Pupo, Díaz Rojas, Rojas Rodríguez, Ricardo Rodríguez, & Aguilera Rodríguez, 2013).

La frecuencia cardiaca normal en reposo de una persona con más de 10 años oscila entre 60 y 100 latidos por minuto (National Institutes of Health NIH, 2017). Durante el ejercicio, una persona sana puede alcanzar una frecuencia cardiaca máxima alrededor de 220 menos la edad de la persona (Centers for Disease Control and Prevention, 2015). En pacientes con EP la frecuencia cardiaca pierde su capacidad de adaptación al requerimiento fisiológico del momento. Según Gómez (2017), “alrededor del 80 por ciento de las personas que padecen párkinson expresan su incapacidad para elevar la frecuencia cardiaca hasta las 150 pulsaciones tras la práctica de ejercicio físico; se quedan, de hecho, en torno a las 80-90 pulsaciones”. No se hallaron valores de la frecuencia cardiaca en reposo de una persona con EP.

La temperatura corporal normal de una persona oscila entre 36.1°C y 37.2°C, usualmente cambia en función de la actividad, la edad y el momento del día. Una temperatura por encima de 38°C es sinónimo de fiebre y una señal de infección o enfermedad en el cuerpo (National Institutes of Health NIH, 2017). Un estudio desarrollado en Bilbao, midió la respuesta de temperatura de las manos cuando se exponen al frío y detectó diferencias de temperatura superiores a 4°C entre personas sanas y personas con EP, las últimas experimentan temperaturas más bajas en sus manos (Asociación Parkinson Bizkaia Asparbi, 2017).

7.1.3. Selección de sensores y microcontrolador

Con base en las entradas o variables de adquisición del dispositivo electrónico, se buscó un conjunto de sensores con capacidad individual para medir al menos una de las

magnitudes definidas (pulso cardiaco, temperatura, aceleración y velocidad angular). La consulta se efectuó en varias tiendas virtuales de dispositivos electrónicos, asegurando la disponibilidad del producto. Se elaboró una tabla comparativa (tabla 3) con los sensores que captaron mayor atención por sus características, o simplemente, por corresponder a los resultados de búsqueda más comunes y repetitivos.

Tabla 3.

Sensores evaluados

Tipo	Nombre	Características						Precio Und.	Aplicaciones	Ventajas
		Voltaje	Corriente	Tipo Salida	Rango	N° de pines	Precisión			
Sensor de temperatura y humedad capacitivo	STH10	2.4 - 5.5V DC	1mA	Digital , serial	-40°C - 123.8°C 0% - 100% RH	4 (GND, DATA, SCK, VDD)	0.5°C 4.5% RH	\$ 23.200	Procesos industriales, controles medioambientales y domótica	Totalmente calibrado, salida digital, bajo consumo de energía, excelente estabilidad a largo plazo

Tipo	Nombre	Características						Precio Und.	Aplicaciones	Ventajas
		Voltaje	Corriente	Tipo Salida	Rango	N° de pines	Precisión			
Sensor de temperatura infrarrojo	GY-906 MLX906 14ESF	3 - 5V DC	2,5mA	PWM, I2C	-70 - 380 °C	4 (VIN, GNDD, SCL, SCA)	0.5°C	\$ 41.760	Procesos industriales, domótica, medición de alta precisión sin contacto, control temperatura electrodomésticos, ganadería, cuidado de salud y medición de temperatura corporal	Pequeño tamaño, modo sleep, Calibración de precisión alta (médica), salida PWM personalizable para lectura continua
Sensor de temperatura y humedad capacitivo	STH11	2.4 - 5.5V DC	1mA	Digital , serial	-40°C - 125°C 0% - 100% RH	4 (GND, DATA, SCK, VDD)	0.4°C 3% RH	\$ 139.000	Procesos industriales, controles medioambientales y domótica	Totalmente calibrado, salida digital, bajo consumo de energía, excelente estabilidad a largo plazo, filtro protector contra agua polvo y otros.
Sensor de temperatura infrarrojo	MLX906 15SSG	3V DC		PWM, SMBu s	-40 – 115 ° C	4 (VIN, GNDD, SCL, SCA)	0.5°C	\$ 43.500	Medición de alta precisión sin contacto, termómetro de oído, termómetro manual, domótica, ganadería, control temperatura	Modo ahorro de energía, alta precisión y resolución

Tipo	Nombre	Características						Precio Und.	Aplicaciones	Ventajas
		Voltaje	Corriente	Tipo Salida	Rango	N° de pines	Precisión			
Acelerómetro triaxial	MMA7361	3.3 - 5V DC	400uA	Analógica	entre $\pm 1.5G$ y $\pm 6G$	10 (X, Y, Z, SL, OG, 5V, 3V3, GND, GS, ST)	sensibilidad ad 800mV/g a 1.5G	\$ 22.040	Robótica, interfaces gestuales, controles remotos por inclinación, equipos portátiles	Compacto, requiere muy poca energía, modo sleep, acondicionamiento de señal, filtro pasabajos de 1 polo, compensación de temperatura, autoprueba y detección de 0g para caída libre
Acelerómetro triaxial	MMA7455	3.3 - 5V DC	26uA	Digital, I2C/SPI	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$	8 (CS, SDO, SDA, SCL, IN1, IN2, GND, VCC)	sensibilidad ad 64 LSB/g	\$ 16.240	Teléfonos móviles/PMP/PDA, unidades de disco duro (HDD) para detección de caída libre, detección de caída libre para portátiles, podómetro	Compacto, bajo consumo de energía, con acondicionamiento de señal, filtro pasa bajos, compensación de temperatura, auto-test, detecta caída libre, detecta pulsos (movimientos rápidos) y errores de ganancia.

Tipo	Nombre	Características						Precio Und.	Aplicaciones	Ventajas
		Voltaje	Corriente	Tipo Salida	Rango	N° de pines	Precisión			
Acelerómetro triaxial	ADXL345	3.3 - 5V DC	140uA	Digital , I2C/SPI	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$	8 (CS, SDO, SDA, SCL, INT1, INT2, GND, VCC)	sensibilidad 4 LSB/g	\$ 13.920	Aplicaciones móviles	Compacto, bajo consumo de energía, alta precisión, buen nivel de potencia
Acelerómetro triaxial, giroscopio triaxial y magnetómetro triaxial	IMU 9 DOF V2	2.5 - 5.5V DC		Digital , I2C	Gyro ± 250 , ± 500 , o $\pm 2000^\circ/s$ Acelerómetro ± 2 , ± 4 , ± 8 o $\pm 16g$ Magnetómetro ± 1.3 , ± 1.9 , ± 2.5 , ± 4.0 , ± 4.7 , ± 5.6 , o ± 8.1 gauss			\$ 96.000	Desde control de posición en robótica móvil hasta vehículos aéreos autónomos	Mide tres propiedades del movimiento en un solo IC
Acelerómetro triaxial, giroscopio triaxial y magnetómetro triaxial	LSM9DS1	2.5 - 5.5V DC	4,5mA	Digital , I2C/SPI	Gyro ± 245 , ± 500 , o $\pm 2000^\circ/s$ Acelerómetro ± 2 , ± 4 , ± 8 o $\pm 16g$ Magnetómetro 4.0 , ± 8.0 , ± 12.0 o ± 16 gauss	13 (GND, VCC, SDA, SCL, DEN, INT2, INT1, INTM, RDY, CSM, CSAG, SDOM, SDOAG)		\$ 76.560	Robótica, controles remotos por inclinación, telefonía, ubicación, orientación, vehículos aéreos, navegación interior, interfaces de usuario inteligentes, reconocimiento avanzado de gestos, dispositivos de entrada de juegos y realidad virtual	Mide tres propiedades del movimiento en un solo IC, compacto, bajo consumo, alta precisión

Tipo	Nombre	Características						Precio Und.	Aplicaciones	Ventajas
		Voltaje	Corriente	Tipo Salida	Rango	N° de pines	Precisión			
Pulso cardiaco		3 -5V DC	5mA	Pulsos		3 (+, -, s)		\$ 46.400	Aplicaciones móviles y médicas	
Pulso cardiaco		3 -5V DC	4mA	Pulsos		3 (+, -, s)		\$ 99.500	Aplicaciones móviles y médicas	

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

La tabla anterior contiene los campos: tipo, nombre o referencia, características, precio o costo, aplicaciones y ventajas; información considerada y evaluada para la selección de los componentes del dispositivo electrónico de adquisición. En la selección primó: (1) el menor coste, (2) las aplicaciones médicas, de salud o de valoración de actividad física, y (3) las ventajas relacionadas con el tiempo de respuesta, la precisión y la cantidad de variables que mide el dispositivo; los componentes escogidos se encuentran sombreados de un tono verde menta en la tabla 3.

Se aclara que adicional a la verificación de disponibilidad del producto, se comprobó que cada dispositivo evaluado fuese ligero, de tamaño pequeño y compacto. Lo anterior se justifica en el planteamiento o la concepción de un dispositivo electrónico de adquisición que mida todas las magnitudes definidas con sensores ubicados en la mano.

Para el procesamiento de los datos captados por los sensores seleccionados se decidió utilizar una tarjeta de desarrollo de hardware con microcontrolador, que facilita el diseño de sistemas embebidos y se caracteriza por seguir una estructura y lenguaje

de programación en particular. Se optó por una plataforma de Arduino, considerando que sus tecnologías son económicas, fáciles de usar y aprender; además de ser ampliamente difundidas y documentadas, por su carácter *Open Source* y *Open Hardware*. Otro motivo para escoger Arduino fue su compatibilidad con todos los sensores evaluados. La Universidad de la Costa CUC proporcionó para esta investigación una pequeña tarjeta de desarrollo de hardware, basada en el microcontrolador ATMEGA328, denominada Arduino Nano.

7.2. Diseño de hardware y software

7.2.1. Diagrama estructural y algoritmo

Se elaboraron diagramas como pauta para guiar y ordenar las tareas de diseño y creación del dispositivo. Las siguientes figuras corresponden al diagrama de bloques (estructura) y el diagrama de flujo (algoritmo) del dispositivo electrónico de adquisición.

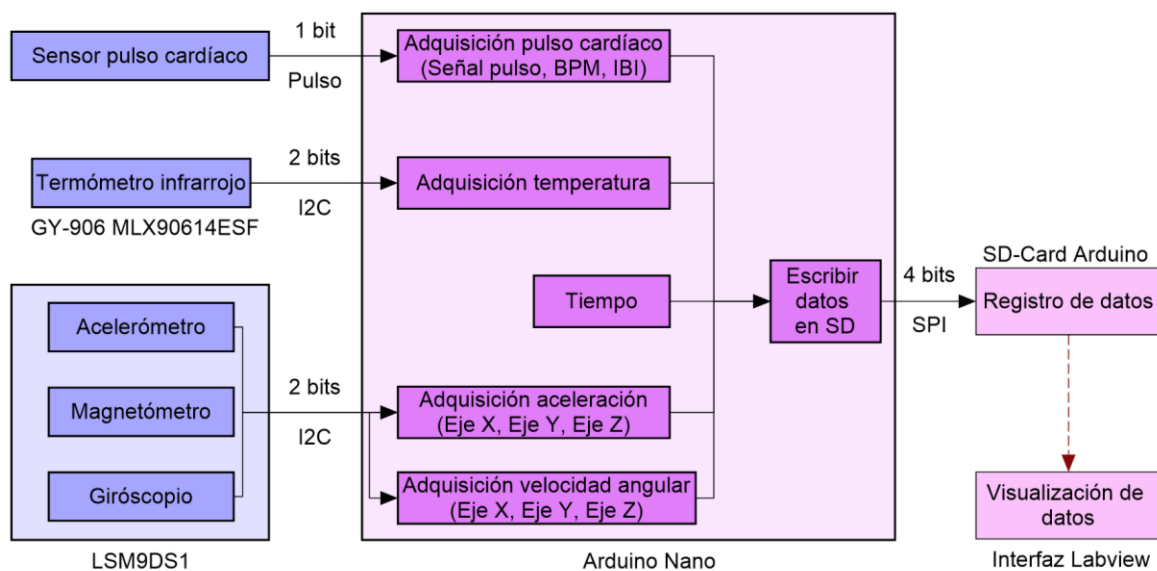


Figura 1. Diagrama de bloques del dispositivo adquisición

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

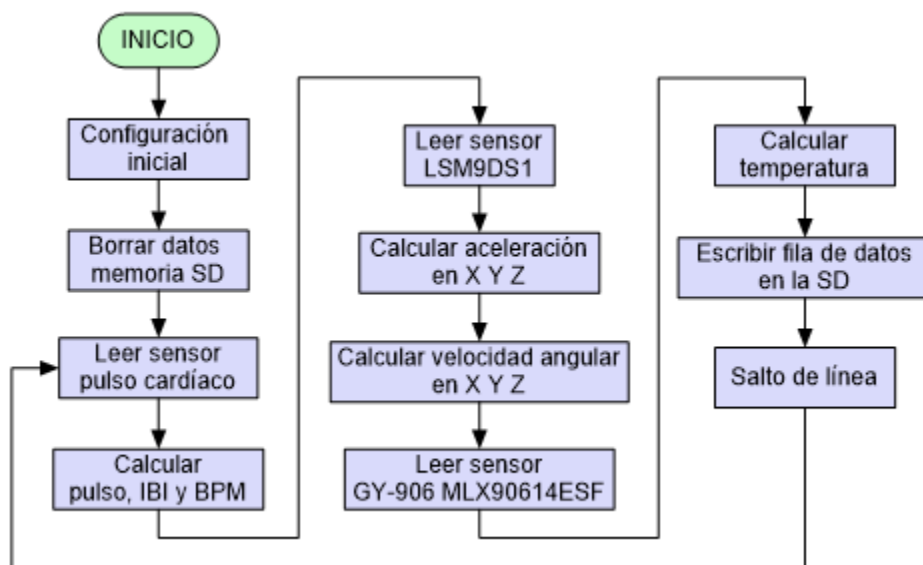


Figura 2. Diagrama de flujo de procesos en Arduino Nano

Fuente: propia.

Los diagramas elaborados son sencillos y sistematizan información relevante. El diagrama de la figura 1 se orienta a la estructura del hardware. Detalla las referencias de los componentes, su interacción y la interfaz de comunicación para la transmisión de datos. Además, provee una noción de los procesos al interior de la Arduino Nano. El diagrama de la figura 2 se orienta al algoritmo del software. Expresa la secuencia lógica de tareas, en lenguaje natural, que ejecuta el microcontrolador de la Arduino Nano.

Nota: En la figura 2, el bloque denominado Configuración inicial hace referencia a activar los recursos necesarios para poner en operación el dispositivo. Abarca acciones como incluir librerías, declarar variables, declarar constantes, declarar pines de entrada y salida, asignar valores, asignar direcciones, definir tiempo y ajustar propiedades de los sensores.

7.2.2. Selección de las herramientas

En esta actividad se eligieron tres herramientas o software de diseño de ingeniería, destinados para la creación de circuitos electrónicos, la generación de códigos fuente y el diseño de sistemas de adquisición y visualización de datos. Las herramientas seleccionadas fueron: Proteus 8 Professional de Labcenter Electronics, Arduino IDE de Arduino y LabVIEW de National Instruments. El software Proteus se escogió por las siguientes razones: funciona en Windows; es muy completo, pues comprende funciones para la simulación y el diseño de circuitos esquemáticos e impresos; posee opciones que optimizan los tiempos de diseño (ubicación y enrutado automático); es fácil de aprender y usar. De hecho en la última apreciación se coincide con Chacha Cajamarca (2017) quien, en su tesis “Diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo inalámbrico para estimular ejercicios de rehabilitación en pacientes con Parkinson”, realizó el diseño del circuito impreso en Proteus por ser “un software con una interfaz sencilla de operar”.

Arduino IDE (Integrated development environment) se escogió principalmente por ser el entorno de programación estándar especialmente diseñado para las tarjetas de desarrollo de hardware de Arduino, como la Arduino Nano. Su lenguaje de programación está basado en C++, su estructura es simple y la mayoría de comandos se encuentran referenciados en la página web de Arduino. Además, maneja librerías propias y librerías compartidas por desarrolladores de códigos en foros y plataformas *Open Source*. Varios investigadores también optaron por usar Arduino en proyectos relacionados con la EP, tal es el caso de García Mejía, Flores Fuentes, Pérez Martínez, Torres Reyes, & González Matias (2015); Punin Sigcha & Barzallo Córdoba (2017); Bermea Maldonado & Bravo Guamán (2016); y Chacha Cajamarca (2017).

Al igual que las herramientas anteriores LabVIEW se seleccionó porque funciona en Windows, es sencillo, amigable y fácil de usar. Este entorno maneja un lenguaje de programación gráfico de propósito general (conocido como G), el cual emplea los mismos conceptos de programación de los lenguajes tradicionales. Aunque a diferencia de estos, no es textual; se crea cableando iconos gráficos dando lugar a un diagrama de procesos (National Instruments NI, 2015). Lo anterior es una ventaja debido a que la programación es intuitiva, visual y no requiere aprender una sintaxis asociada al lenguaje. García Mejía, Flores Fuentes, Pérez Martínez, Torres Reyes, & González Matias (2015) en el proyecto “Un sistema de medición del temblor parkinsoniano, una alternativa no invasiva basada en instrumentación virtual”, codificaron la información lógica del instrumento virtual con LabVIEW.

Cabe añadir que las tres herramientas seleccionadas (Proteus, Arduino y LabVIEW) pueden integrarse y operar juntas; aunque en este proyecto se trabajaron por separado.

7.2.3. Circuito esquemático e impreso

Previo al diseño del circuito esquemático e impreso, se plantearon las conexiones de dispositivo electrónico en la figura 3. Allí se trazaron los enlaces entre componentes, incluyendo los enlaces de alimentación eléctrica. Para establecer las conexiones se tuvo en cuenta: la información de la hoja de especificaciones técnicas (*datasheet*) de cada sensor y la interfaz de comunicación definida en el diagrama de bloques de la figura 1.

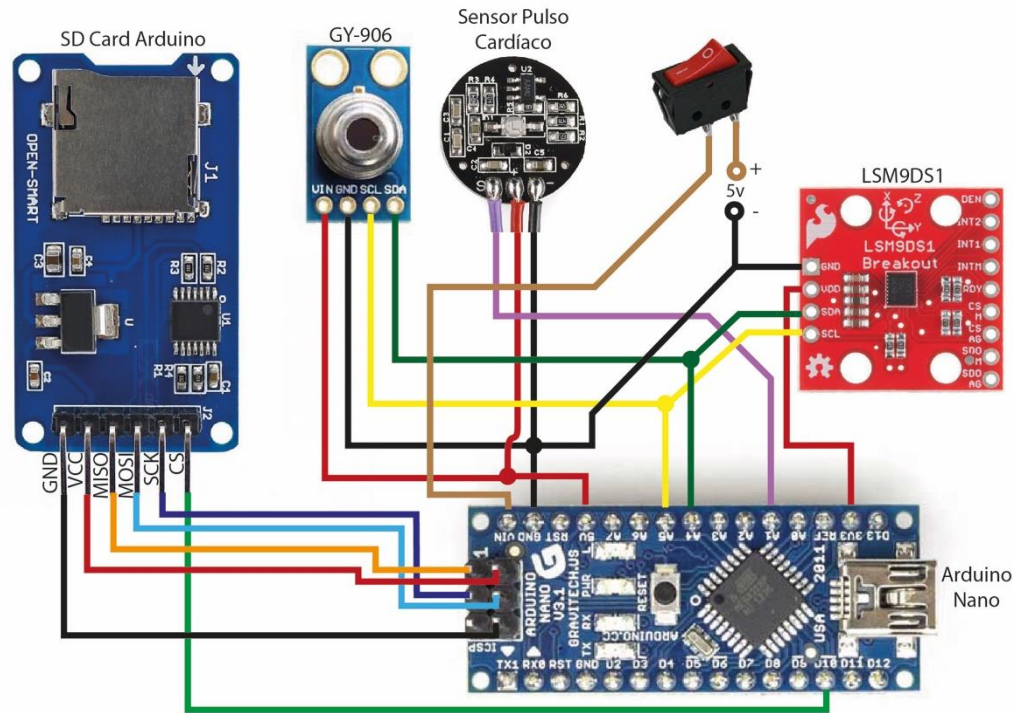


Figura 3. Conexiones del dispositivo de adquisición

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

La figura 3 indica que la SD Card Arduino se conecta a la cabecera ICSP de la Arduino Nano, mientras los demás componentes se conectan a los pines laterales de la misma tarjeta. Los pines para la comunicación SPI entre la SD Card y la Arduino Nano son: MISO, MOSI, SCK y CS. Los sensores GY-906 y LSM9DS1 se comunican con la Arduino Nano por I2C, así que comparten los pines SDA y SCL. La salida digital del sensor de pulso cardíaco se conecta al pin A1. El voltaje de alimentación ingresa por el pin Vin de la Arduino Nano y se distribuye a los demás componentes por los pines 5V y 3V3. La tierra es compartida y el dispositivo posee un interruptor ON/OFF.

Desde un principio se pensó el dispositivo como un guante electrónico. Por ello todas las tareas de diseño se enfocaron en hacer el dispositivo lo más cómodo y ligero posible. Se decidió dividir el dispositivo en dos piezas, porque la Arduino Nano junto con

la SD-Card Arduino, el interruptor y la batería, añadían peso, ocupaban espacio, podían afectar el movimiento (sujeto a medida) y sus funciones no requerían contacto directo con las variables de adquisición.

Se diseñó en Proteus un circuito de terminales para conectar y acoplar la Arduino Nano con los demás componentes. Se logró el circuito esquemático de la figura 4 y el circuito impreso de la figura 5.

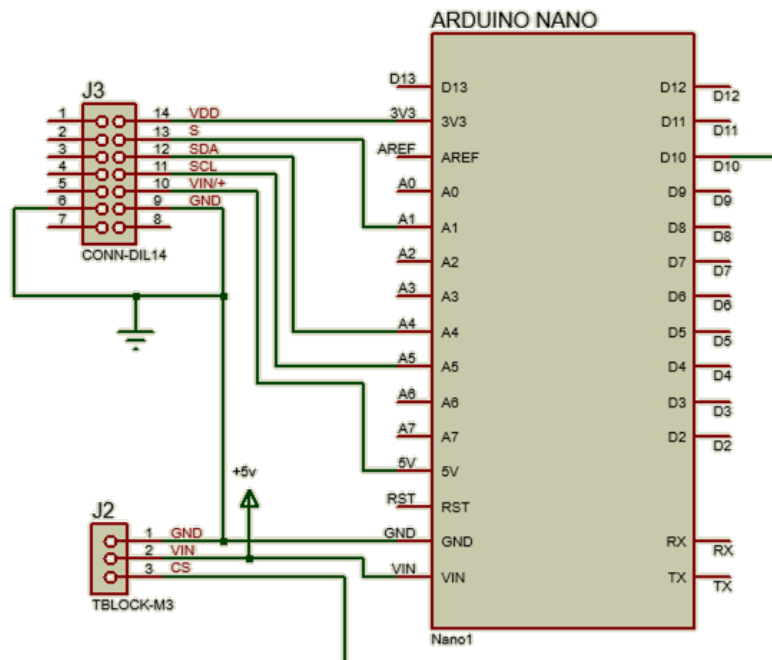


Figura 4. Circuito de terminales para Arduino Nano (diseño esquemático)

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

El diseño de la figura 4 se realizó bajo las siguientes consideraciones: (1) todas las tierras están unidas; (2) el voltaje de alimentación no es el mismo para todos los elementos (3,3V DC para el sensor LSM9DS1; 5V DC para los demás).

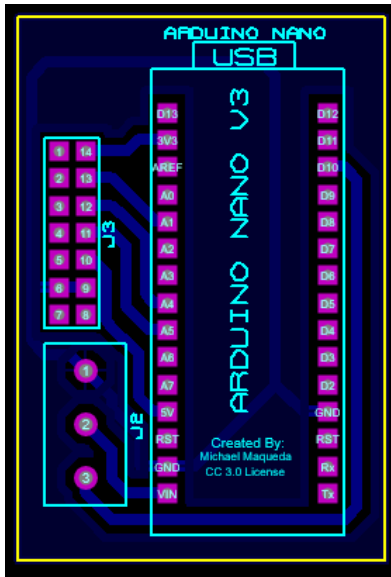


Figura 5. Circuito de terminales para Arduino Nano (diseño PCB)

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

El diseño de la figura 5 se realizó bajo las siguientes consideraciones: (1) un plano común de tierra; (2) una capa de enrutamiento o trazado de pistas; (3) pistas de grosor T40.

7.2.4. Código fuente

Se programó en Arduino el código fuente del dispositivo electrónico de adquisición, siguiendo el algoritmo presentado en el diagrama de flujo de procesos de la figura 2. Las siguientes figuras son fragmentos del código fuente con instrucciones encaminadas a tareas o acciones concretas.

```

5 | #include <SPI.h>
6 | unsigned long Time_inicio = 0;
7 | const int chipSelect = 10;
8 |
9 | ///////////////////////////////////////////////////
10 | //          SENSOR GY906 MLX90614          //
11 | ///////////////////////////////////////////////////
12 | #include <i2cmaster.h>
13 |
14 | ///////////////////////////////////////////////////
15 | //          SENSOR LSM9DS1          //
16 | ///////////////////////////////////////////////////
17 | #include <Wire.h> //add arduino I2C library;
18 | //list of all registers binary addresses;
19 | byte ACT_THS          = 0B000000100;
20 | byte ACT_DUR          = 0B000000101;
21 | byte INT_GEN_CFG_XL   = 0B000000110;

```

Figura 6. Fragmento código fuente - configuración inicial

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En la figura 6 se visualizan algunas de las instrucciones que hacen parte del código fuente y efectúan la configuración inicial. Las líneas 5, 12 y 17 incluyen librerías; la línea 6 declara el valor inicial del tiempo; la línea 7 define y nombra un pin de entrada de la Arduino Nano; las líneas 19, 20 y 21 configuran direcciones del sensor LSM9DS1.

```

184 | ///////////////////////////////////////////////////
185 | //          TARJETA SD          //
186 | ///////////////////////////////////////////////////
187 | if (!SD.begin(chipSelect)) {
188 |     //    Serial.println("Card failed, or not present");
189 |     // don't do anything more:
190 |     return;
191 | }
192 | if (SD.exists("data.txt")) {
193 |     //Serial.println("data.txt exists.");
194 |     SD.remove("data.txt");
195 | }

```

Figura 7. Fragmento código fuente - borrar datos SD

Fuente: propia.

En la figura 7 se visualizan algunas de las instrucciones que hacen parte del código fuente y efectúan la tarea borrar datos SD. Las líneas 187 – 191 consultan si hay una memoria SD en la SD Card Arduino; las líneas 192 – 195 consultan si existe un archivo de nombre específico en la memoria y lo borran.

```

207 | if (QS == true) {    // A Heartbeat Was Found
208 |     // BPM and IBI have been Determined
209 |     // Quantified Self "QS" true when arduino finds a heartbeat
210 |     fadeRate = 255;    // Makes the LED Fade Effect Happen
211 |     // Set 'fadeRate' Variable to 255 to fade LED with pulse
212 |     serialOutputWhenBeatHappens();    // A Beat Happened, Output that to serial.
213 |     QS = false;        // reset the Quantified Self flag for next time
214 | }

```

Figura 8. Fragmento código fuente - leer y calcular pulso cardiaco

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En la figura 8 se visualizan algunas de las instrucciones que hacen parte del código fuente y efectúan la tareas leer y calcular pulso cardiaco. La línea 207 determina si hubo un latido; la línea 212 hace un llamado a subrutina que calcula el valor del pulso, la frecuencia cardiaca y el intervalo entre pulsaciones; la línea 213 resetea una bandera o variable para la próxima detección del latido.

```

254 | double X_EJE_G = 0.00875 *(X_AXIs+110);
255 | double Y_EJE_G = 0.00875 *(Y_AXIs+190);
256 | double Z_EJE_G = 0.00875 *(Z_AXIs+115);
257 | X_AXIs = int(X_EJE_G);
258 | Y_AXIs = int(Y_EJE_G);
259 | Z_AXIs = int(Z_EJE_G);
260 | X_EJE_G = (X_EJE_G - X_AXIs)*1000;
261 | Y_EJE_G = (Y_EJE_G - Y_AXIs)*1000;

```

Figura 9. Fragmento código fuente - calcular velocidad angular

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En la figura 9 se visualizan algunas de las instrucciones que hacen parte del código fuente y efectúan la tarea calcular velocidad angular. Las líneas 254 – 256 operan el

valor leído por el giroscopio para que la unidad de la velocidad angular medida sea dps; las líneas 257 – 261 separan la parte entera y la parte decimal de la velocidad angular para efectos de escritura en la memoria SD.

```

293 | int X_AXIS_A = X_H_A << 8 | X_L_A;
294 | int Y_AXIS_A = Y_H_A << 8 | Y_L_A;
295 | int Z_AXIS_A = Z_H_A << 8 | Z_L_A;
296 |
297 | double X_EJE_A = X_AXIS_A * 0.000061;
298 | double Y_EJE_A = Y_AXIS_A * 0.000061;
299 | double Z_EJE_A = Z_AXIS_A * 0.000061;
300 | X_AXIS_A = int(X_EJE_A);
301 | Y_AXIS_A = int(Y_EJE_A);
302 | Z_AXIS_A = int(Z_EJE_A);

```

Figura 10. Fragmento código fuente - leer y calcular aceleración

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En la figura 10 se visualizan algunas de las instrucciones que hacen parte del código fuente y efectúan las tareas leer y calcular aceleración. Las líneas 293 – 295 leen los registros del acelerómetro; las líneas 297 – 298 operan el valor leído para que la unidad de la aceleración medida sea g; las líneas 300 – 302 separan la parte entera de la aceleración para efectos de escritura en la memoria SD.

```

370 | tempData = (double) (((data_high & 0x007F) << 8) + data_low);
371 | tempData = (tempData * tempFactor) - 0.01;
372 |
373 | float celcius = tempData - 273.15;
374 | int celcius_dec = (celcius - int(celcius)) * 100;
375 | celcius_dec = abs(celcius_dec);

```

Figura 11. Fragmento código fuente - leer y calcular temperatura

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En la figura 11 se visualizan algunas de las instrucciones que hacen parte del código fuente y efectúan las tareas leer y calcular temperatura. La línea 370 lee los registros del sensor de temperatura; las líneas 371 y 373 operan el valor leído para que la unidad de

la temperatura medida sea °C; las líneas 374 y 375 separan la parte decimal de la temperatura para efectos de escritura en la memoria SD.

```
387 | File dataFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
388 | if (dataFile) {
389 |     dataFile.print(millis() - Time_inicio);
390 |     dataFile.print("\t");
391 |     dataFile.print(X_AXIS_A);
392 |     dataFile.print(",");
393 |     dataFile.print(X_EJE_A,0);
394 |     dataFile.print("\t");
395 |     dataFile.print(Y_AXIS_A);
396 |     dataFile.print(",");
397 |     dataFile.print(Y_EJE_A,0);
```

Figura 12. Fragmento código fuente – escribir datos SD

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En la figura 12 se visualizan algunas de las instrucciones que hacen parte del código fuente y efectúan la tarea escribir datos en la SD. La línea 387 abre la memoria SD y crea el archivo de datos; la línea 389 escribe el dato tiempo; las líneas 390 y 394 insertan tabulaciones; las líneas 391 – 393 escriben la parte entera y la parte decimal de la aceleración en el eje X, separadas por coma; las líneas 395 – 397 escriben la parte entera y la parte decimal de la aceleración en el eje Y, separadas por coma

7.2.5. Interfaz gráfica

Los datos que el dispositivo de adquisición mide y escribe en la memoria SD se analizan en una interfaz gráfica creada en LabVIEW. El instrumento virtual se trabajó sobre dos ventanas denominadas: panel frontal y diagrama de bloques. En la primera ventana se diseñó la apariencia de la interfaz gráfica que interactúa con el usuario, se le agregaron botones, gráficas y otros controles; el resultado final se aprecia en las figuras 13 y 14.



Figura 13. Interfaz inicial

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

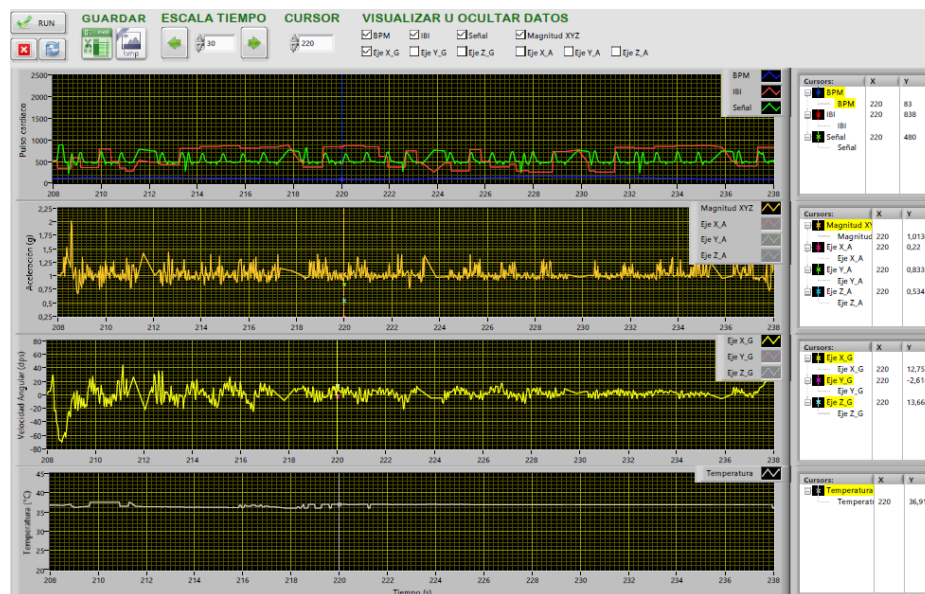


Figura 14. Interfaz al abrir algún archivo

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

El entorno gráfico se perfiló con una barra de opciones, cuatro planos para gráficos y cuatro tablas de valores. Al iniciar la interfaz los planos, las tablas y la mayoría

de opciones están deshabilitadas, por lo que aparecen en tonos claros y grises como se aprecia en la figura 13. En la interfaz inicial, el usuario solo puede operar 3 botones de la barra de opciones: *run*, *stop* y *refresh*. Todos los elementos de la interfaz se habilitan y cambian de tono al abrir un archivo de entrada de datos, como se observa en la figura 14.

En la ventana diagrama de bloques se programaron (en lenguaje G) las funciones, el estado y las relaciones de los objetos en la interfaz gráfica; parte del código fuente se muestra en la figura 15.

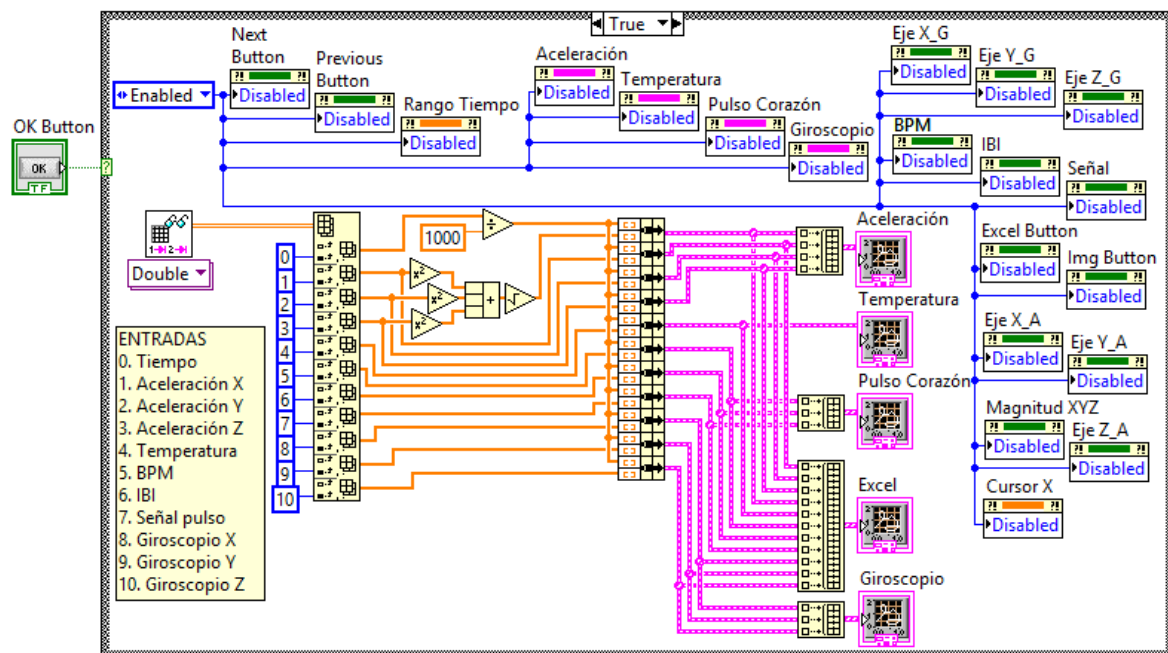


Figura 15. Código fuente de la interfaz gráfica

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En el fragmento del código compartido en la figura 15, se pueden notar las funciones que desencadena el botón *OK* en estado *true* (botón *RUN* en la interfaz, cuando es presionado). Las cuales se enuncian a continuación:

- Habilita objetos deshabilitados.
- Lee el archivo como texto numérico y lo organiza.




- Calcula la magnitud de la aceleración en los tres ejes (Magnitud XYZ).
- Modifica la unidad de tiempo de milisegundo a segundo.
- Agrupa series de datos y las dibuja en los planos de gráficos.



Para el correcto funcionamiento y uso de la interfaz gráfica la extensión del archivo de entrada debe terminar en .txt. Asimismo, el archivo debe contener 11 columnas y n cantidad de filas con datos numéricos; si el dato es decimal el separador decimal debe ser una coma (,); las columnas se separan por tabulaciones. Los datos de la fila han de presentar el siguiente orden y unidades:



- Columna 0: tiempo o momento en que se escriben los demás datos de la fila (ms)
- Columna 1: aceleración medida en el eje X (g)
- Columna 2: aceleración medida en el eje Y (g)
- Columna 3: aceleración medida en el eje Z (g)
- Columna 4: temperatura corporal (°C)
- Columna 5: frecuencia cardiaca (BPM) (ppm)
- Columna 6: intervalo de tiempo entre latidos (IBI) (ms)
- Columna 7: valor de la onda o señal de pulso cardiaco (Señal)
- Columna 8: velocidad angular medida en el eje X (dps)
- Columna 9: velocidad angular medida en el eje Y (dps)
- Columna 10: velocidad angular medida en el eje Z (dps)


Nota: La información anterior puede interesarle al usuario que desee analizar un archivo de datos no proveniente del dispositivo electrónico de adquisición.


En la parte superior izquierda de la interfaz se ubicó la barra de opciones, dividida en 5 categorías: inicio, guardar, escala tiempo, cursor y visualizar u ocultar datos. La

categoría inicio se compone de tres botones: *run*, *stop* y *refresh*. El botón *run*  abre el explorador de archivos para que el usuario busque el archivo de entrada y lo cargue en la interfaz. El botón *stop*  detiene la ejecución de la interfaz y borra los gráficos presentes en todos los planos de la misma. El botón *refresh* , al igual que el botón *stop*, borra los gráficos presentes en todos los planos de la interfaz.

La categoría guardar se compone de dos botones: Excel e imágenes. El botón Excel  genera un archivo Excel temporal con todos los datos del archivo de entrada, más el dato de magnitud XYZ, que se calcula y grafica en la interfaz con los valores de aceleración en los ejes X, Y y Z. Las unidades de los datos en el archivo Excel coinciden con las unidades de medición del dispositivo electrónico de adquisición, exceptuando el tiempo que en Excel está en segundos. Al provenir de la velocidad angular, la unidad de la magnitud XYZ es dps. El botón imágenes  crea y guarda una captura de imagen, por plano y en formato bmp, de los gráficos presentes en cada plano de la interfaz al momento de presionar el botón. Es decir, solo captura lo que en ese instante visualiza el usuario en la interfaz. La interfaz despliega una ventana que informa el orden de las capturas por plano y el usuario decide la ubicación y el nombre de las imágenes.

La categoría escala tiempo se compone de dos botones y un control numérico. Los botones izquierda y derecha   corren el rango visible del eje de las abscisas en todos los planos de la interfaz, hacia la izquierda y derecha, respectivamente. Cada que vez que se presione uno de los botones, la escala del eje se corre una unidad. Ejemplo: si la escala va de 0 a 30 y se presiona el boton derecha, la escala irá de 1 a 31; si la escala va de 0 a 30 y se presiona el boton izquierda, la escala irá de -1 a 29. Si se desea correr la escala de forma rápida y en más de una unidad, se pueden presionar los flechas direccionales izquierda y

derecha del teclado. El control numérico  amplía o reduce el rango visible del eje de las abscisas en todos los planos de la interfaz. Cada que vez que se presione uno de los botones del control numérico el rango cambia una unidad; el rango tambien puede modificarse ingresando su valor en el recuadro blanco del control numérico. Ejemplo: si la escala va de 1 a 31, su rango es de 30; si se modifica el valor del control numérico de 30 a 40, la escala irá de 1 a 41.

La categoría cursor tiene un control numérico , que posiciona al cursor (línea vertical indicadora y punteada en los planos para gráficos de la interfaz) en un valor específico del eje de las abscisas de todos los planos de la interfaz. Cada que vez que se presione uno de los botones del control numérico la posición del cursor cambia una unidad; la posición tambien puede modificarse ingresando su valor en el recuadro blanco del control numérico. Ejemplo: si el recuadro del control numérico tiene un valor de 220, el cursor se posicionará en 220; si se presiona el boton inferior del control numérico, el valor del recuadro cambiará a 219 y el cursor se posicionará en 219; si se cambia el valor del recuadro por 30,5, el cursor se posicionará en 30,5.

La categoría visualizar u ocultar datos se compone de diez casillas de verificación que el usuario puede marcar ☒ o desmarcar ☐ para visualizar u ocultar las series de datos graficadas en los planos de la interfaz, respectivamente. El gráfico de la serie de temperatura siempre es visible, porque se ilustra individualmente en un plano de la interfaz y los gráficos de las demás series no interfieren en su interpretación.

Bajo la barra de opciones se encuentran los cuatro planos para gráficos de la interfaz, uno encima del otro. El eje de las abscisas representa el tiempo en los 4 planos; su escala permite visualizar total o parcialmente los gráficos de las series datos, según la

escala de tiempo que defina el usuario en la barra de opciones. El eje de las ordenadas representa las magnitudes del resto de datos; su escala se ajusta de forma automática al valor máximo y mínimo de los datos (exceptuando el tiempo, por no ser representado en ese eje). Con esta configuración de ejes se observa la evolución o progresión de varias series de datos en relación con el tiempo.

En la parte superior derecha de cada plano hay un recuadro de leyenda que indica y distingue el contenido del plano. De arriba hacia abajo, el primer plano contiene tres series de datos relacionadas con el pulso cardiaco (BPM, IBI y Señal); el segundo, cuatro series de datos relacionadas con la aceleración (magnitud XYZ, eje X, eje Y y eje Z); el tercero, tres series de datos relacionadas con la velocidad angular (eje X, eje Y y eje Z); el cuarto y último, la serie de temperatura.

A la derecha de cada plano se encuentra una tabla de valores, que solo registra un valor (X, Y) por cada serie de datos contenida en el plano. Los valores de las cuatro tablas dependen de la posición del cursor, definida por el usuario en la barra de opciones. X es el valor de tiempo, en el eje de las abscisas, donde se posiciona el cursor. Y es el valor de la serie de datos, en el eje de las ordenadas, registrado en el tiempo X.

7.2.6. Hardware del dispositivo

La fabricación del hardware del dispositivo electrónico inició con la materialización del circuito de terminales, siguió con la confección de las dos piezas del dispositivo y terminó con el montaje y conexión de todas las partes. La tabla 4 es un inventario de los materiales, componentes y herramientas utilizados en la construcción; en ella puntualiza la parte donde se usó o situó el material, la herramienta o el componente.

Tabla 4.

Materiales, componentes y herramientas

Tipo	Nombre	Circuito	Pieza 1 (guante)	Pieza 2 (caja de circuitería)	Conector de piezas
Materiales	Papel Propalcote	x			
	Percloruro de hierro	x			
	Estaño para soldar	x		x	
	Pasta para soldar	x		x	
	Alcohol Isopropílico	x			
	Baquelita virgen	x			
	Regletas de pines	x			x
	Terminal de bloque de 3 pines	x			
	Esmalte	x			
	Cinta elástica		x	x	
	Velcro		x	x	
	Tela		x	x	
	Hilo		x	x	
	Caja de proyectos			x	
	Amarres plásticos			x	
	Cables			x	x
	Cinta aislante			x	
	Cinta pegante o de enmascarar	x		x	
	Silicona			x	x
	Conector ribbon				x
Componentes	Ardino Nano	x		x	
	SD Card Arduino			x	
	Batería externa			x	
	Interruptor			x	
	Sensor pulso cardiaco		x		
	Sensor LSM9DS1		x		
	Sensor GY-906 MLX90614ESF		x		
Herramientas	Pistola de silicona			x	x
	Motor Tool y juego de brocas	x		x	
	Tijeras y Exacto	x	x	x	x
	Juego de pinzas	x		x	x
	Cautín	x		x	
	Desoldador de estaño	x		x	
	Multímetro	x		x	x

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Para lograr el circuito de terminales se imprimió el diseño de PCB en el papel Propalcote. Seguidamente se fijó el papel en la baquelita virgen y se planchó el material por un tiempo aproximado de 20 minutos. Después de planchar se retiró el papel con agua, se marcaron o corrigieron los trazos de tinta no transferidos del papel a la baquelita y se procedió con el atacado (usando una solución acuosa de percloruro de hierro). Se limpió la baquelita y se probó la continuidad de las pistas de cobre. Luego, se perforó la baquelita y se soldaron las regletas y el terminal de tres pines a la misma. Posteriormente se limpió el circuito con alcohol isopropílico y se selló la capa de cobre con esmalte para proteger sus pistas y conexiones. En la figura 16 se muestra el resultado de los pasos anteriores.

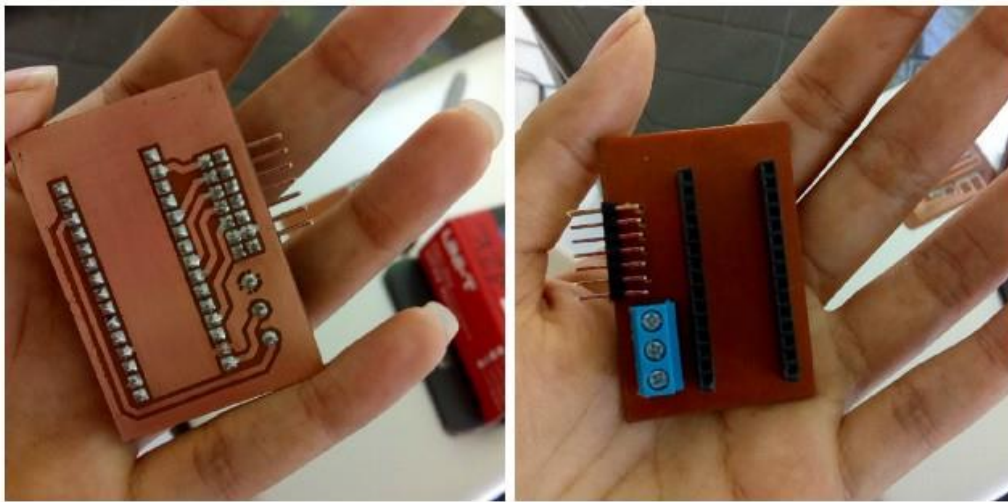


Figura 16. PCB fabricado

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

El lado izquierdo de la figura anterior corresponde a la vista inferior del PCB, donde se observa el trazado de las pistas de cobre y los puntos de soldadura. El lado derecho de la figura anterior corresponde a la vista superior del PCB, donde se observa la posición de las regletas y del terminal de tres pines.

Se confeccionaron dos versiones de guante. La primera versión se hizo con tela elástica deportiva (Lycra Power), cubría todos los dedos de la mano y tenía bolsillos para los sensores. Al probar la prenda (figura 17) se presentaron dificultades para ubicar y ajustar el sensor de pulso con los dedos cubiertos; adicionalmente los sensores tendían a desacoplarse del conector o salirse de los bolsillos. Para la segunda versión no se consiguió la misma tela, el guante se hizo con tela deportiva menos elástica, deja al descubierto los dedos y en vez de bolsillos tiene cintas (elásticas y velcro) para garantizar la fijación y ajuste de los sensores.



Figura 17. Dispositivo electrónico (guante versión 1)

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Los elementos que no forman parte del guante porque añadían peso e incomodidad, se instalaron y fijaron en la otra pieza; una caja de circuitería con correa ajustable al brazo,

como se observa en la esquina inferior izquierda de la figura 17. Al confeccionar la caja de circuitería, se modificó la estructura de la caja de proyectos, se crearon calcomanías, se cargó el código fuente en la Arduino Nano y se insertó la tarjeta en el circuito de terminales. Además, se cablearon los elementos (batería, interruptor, circuito de terminales y SD-Card Arduino) entre sí y se organizaron dentro de la caja con la ayuda de amarres, cinta y silicona.

Las piezas del dispositivo electrónico (guante y caja de circuitería) se comunican mediante un cable bus de datos, elaborado con cable Ribbon, regletas y conector Ribbon. El prototipo resultante (figura 18) requiere elementos adicionales para su uso, estos son: (1) cintas para fijar el sensor de pulso cardiaco al dedo índice de la mano; (2) tarjeta de memoria micro SD para guardar información (se inserta en el interior de la caja, en la ranura de la SD-Card Arduino); (3) porta tarjeta o adaptador de memoria micro SD para leer y visualizar la información de la memoria en el computador.



Figura 18. Dispositivo electrónico (guante versión 2)

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

El diseño del guante en la figura anterior es derecho; aun así, puede usarse en la mano izquierda. En la mano derecha el sensor de pulso cardiaco se ubica en la gema del dedo índice, mientras los sensores restantes quedan sobre el dorso de la mano. En la mano izquierda el sensor de pulso cardiaco se mantiene en la gema del dedo índice, mientras los sensores restantes quedan bajo la palma de mano.

Las características técnicas del dispositivo construido son las siguientes:

- Voltaje operación: 5V DC
- Frecuencia muestreo: 37Hz
- Unidades de medición:
 - Tiempo - ms
 - Aceleración en eje X - g
 - Aceleración en eje Y - g
 - Aceleración en eje Y - g
 - Temperatura - °C
 - BPM - ppm
 - IBI - ms
 - Señal pulsos - sin unidad
 - Velocidad angular en eje X - dps
 - Velocidad angular en eje Y - dps
 - Velocidad angular en eje Y - dps
- Rangos de medición por sensor:
 - Aceleración LSM9DS1, $\pm 2g$
 - Temperatura GY906MLX90614ESF, -40 a +85°C

- Sensor pulso cardiaco, sin rango
 - Velocidad angular LSM9DS1, ± 500 dps
- Microcontrolador: ATmega328 con velocidad de reloj de 16MHz
- Interruptor *ON/OFF*: Si
- Ranura para memoria micro SD: Si
- Almacenamiento: GB de capacidad de la memoria micro SD
- Salida: archivo (DATA.txt) escrito en la memoria micro SD. Si en la memoria existe otro archivo con el mismo nombre, se sobrescribe.
- Modo de carga: cableada por conector micro USB

8. Puesta a punto

El objetivo de la fase puesta a punto es realizar pruebas de validación de funcionamiento del dispositivo electrónico. A continuación, se detalla la metodología y resultados de esta fase:

8.1. Población y muestra

La población seleccionada para el presente estudio ostenta las siguientes características:

- Alcance: Barranquilla y su área metropolitana
- Periodo aplicación de prueba: Junio – Septiembre del 2018
- Elementos: personas mayores de edad en Colombia (18 años en adelante), que vivan, trabajen o estudien en Barranquilla y su área metropolitana, conscientes de su estado médico actual, sanas o con Enfermedad de Parkinson (EP).

La muestra es un subconjunto representativo de la población. En el presente estudio se definió un tamaño de muestra de 14 personas. Se aplicó un muestreo estratificado, donde la variable de estratificación es el estado de salud. Se determinaron dos estratos: persona sana (grupo A) y persona diagnosticada con EP (grupo B). Cada estrato aporta el 50% de la muestra, es decir, 7 personas. La búsqueda para conformar el grupo B se apoyó en profesionales y personas en contacto con pacientes diagnosticados de Parkinson.

8.2. Pruebas de funcionamiento

Las pruebas se realizaron bajo condiciones previamente definidas y socializadas de forma oral y escrita. Las personas participaron de manera voluntaria, no recibieron pago, ni tuvieron gasto alguno por participar. Antes de iniciar la prueba, el participante debía diligenciar un formato de consentimiento informado, recibir un instructivo de prueba y

manifestar su posición frente a la recolección de evidencia audiovisual. Durante la prueba, el participante debía atender todas las instrucciones del evaluador o aplicador, aunque podía hacer preguntas sobre la prueba y de retirarse de la misma, en cualquier momento, sin perjuicio alguno.

El tiempo estimado de aplicación de la prueba fue de 20 minutos. No obstante, la adquisición de datos con el dispositivo electrónico solo tomaba 5 minutos de ese lapso. El tiempo restante se consumía en poner, ajustar y quitar el dispositivo electrónico del cuerpo del participante, guardar el archivo resultante y charlar con el participante.

Se aplicó la misma secuencia de prueba en el grupo A y B. Primeramente se solicita al participante tomar asiento y mantener el cuerpo relajado, pero con buena postura. Luego, se coloca el dispositivo electrónico en el cuerpo del participante y se verifica el estado de las conexiones guante – conector y conector – caja de circuitería. Se enciende el dispositivo y se inicia el cronómetro. El participante adopta una posición o actividad conforme al tiempo transcurrido, como se refleja en la tabla 5.

Tabla 5.

Tareas asignadas al participante durante la adquisición de datos

Minuto	Acción / Posición	Abreviación
0:00 a 2:00	Brazo y antebrazo forman un ángulo cercano a 90° y reposan sobre el muslo	Posición 1
2:00 a 2:15	Extremidad superior (brazo, antebrazo y mano) forma un ángulo de 180°, como si fuera a estrechar la mano de alguien en frente. Dedos de la mano juntos, a excepción del pulgar que apunta hacia arriba.	Posición 2
2:15 a 3:30	Escribe la frase “Enfermedad de Parkinson” dos veces (1 en letra cursiva y 1 en letra imprenta) apoyado en el muslo. Después retoma la posición inicial.	Acción 1
3:30 a 4:00	Agita la extremidad superior (brazo, antebrazo y mano), como si estuviera saludando.	Acción 2
4:00 a 5:00	Retoma la posición inicial.	Posición 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Las tareas asignadas y descritas en la tabla anterior se relacionan con la estabilidad corporal, la motricidad fina y la motricidad gruesa. Al cumplir cinco minutos se apaga el dispositivo y se retira del cuerpo del paciente. La figura 19 es un collage de fotos tomadas en la etapa de pruebas.



Figura 19. Pruebas de funcionamiento en muestra seleccionada

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

En las fotos del lado izquierdo de la figura 19 aparecen sujetos sanos, mientras en la foto del centro y las fotos del lado derecho aparecen sujetos con EP.

Después de retirar el dispositivo electrónico de adquisición, se abría la caja y se retiraba la memoria SD. Esta se insertaba en el adaptador de memoria micro SD, que a su vez, se insertaba en el puerto de entrada SD o lector SD del computador. Al abrir la unidad de memoria se observa un único archivo, con formato .txt y nombre DATA. Abriendo este archivo con el programa Bloc de notas, se pueden ver los valores de los datos adquiridos en

la disposición descrita en el ítem 7.2.5. La figura 20 muestra el contenido de uno de los archivos escritos en la memoria micro SD en la etapa de pruebas.

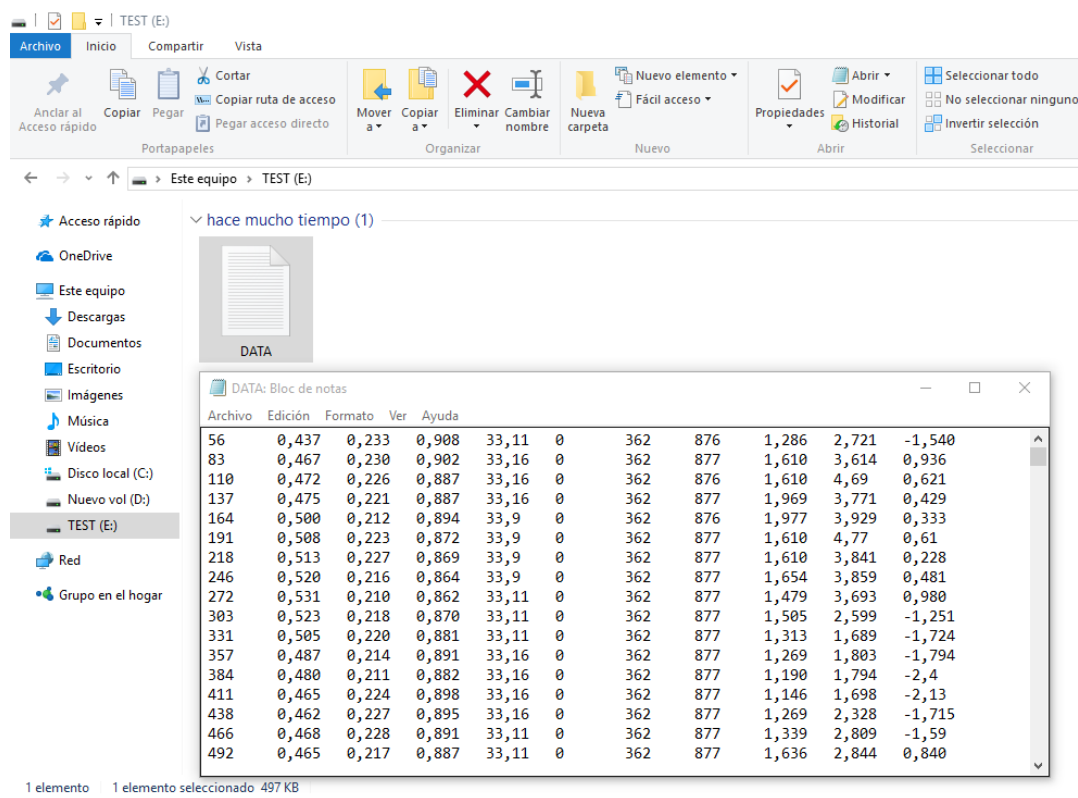


Figura 20. Abriendo archivo DATA en el computador

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

El archivo creado por el dispositivo electrónico siempre se va a llamar DATA, como se aprecia en la figura 20; entre prueba y prueba el dispositivo electrónico sobrescribe el archivo en la memoria, borrando los datos de la prueba anterior. Por lo tanto, después de cada adquisición de datos con el dispositivo, el archivo se abrió, se copió en una carpeta específica y se renombró para distinguirlo de los demás archivos creados en la etapa de pruebas. Todos los archivos renombrados empiezan con las letras EP, haciendo referencia a la Enfermedad de Parkinson. Les sigue un guion medio y la letra C o S, dependiendo de si el archivo contenía datos de un participante con o sin la enfermedad, respectivamente.

Nuevamente sigue un guion medio y un número consecutivo de dos dígitos (01, 02, 03, 04,..., 13, etc.). Por último, sigue un guion medio y la letra D o I, dependiendo de si el guante se colocó en la mano derecha o izquierda, respectivamente.

8.3. Análisis de resultados

A continuación, se muestra y analiza parte de los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento. La cantidad de datos por archivo es extensa y el número de variables a comparar es considerable; así que se decidió sesgar el análisis por tareas asignadas en franjas de tiempo delimitadas. La posición 1 se examinó en la franja de 10 a 70 segundos (minuto 00:10 - 1:10). La posición 2 se examinó en la franja de 120 a 135 segundos (minuto 02:00 - 2:15). La acción 1 se examinó en la franja de 140 a 180 segundos (minuto 02:20 - 3:00). La acción 2 se examinó en la franja de 210 a 250 segundos (minuto 03:30 - 4:10). En adición, por cada tarea solo se compararon 4 de los 14 archivos de datos, 2 del grupo A y 2 del grupo B.

8.3.1. Posición 1 (reposo, mano y antebrazo apoyados en la pierna)

Las figuras 21 y 22 son capturas de pantalla de la interfaz con información de sujetos pertenecientes al grupo A. Las figuras 23 y 24 son capturas de pantalla de la interfaz con información de sujetos pertenecientes al grupo B. La franja de tiempo en las 4 figuras corresponde a la posición 1.

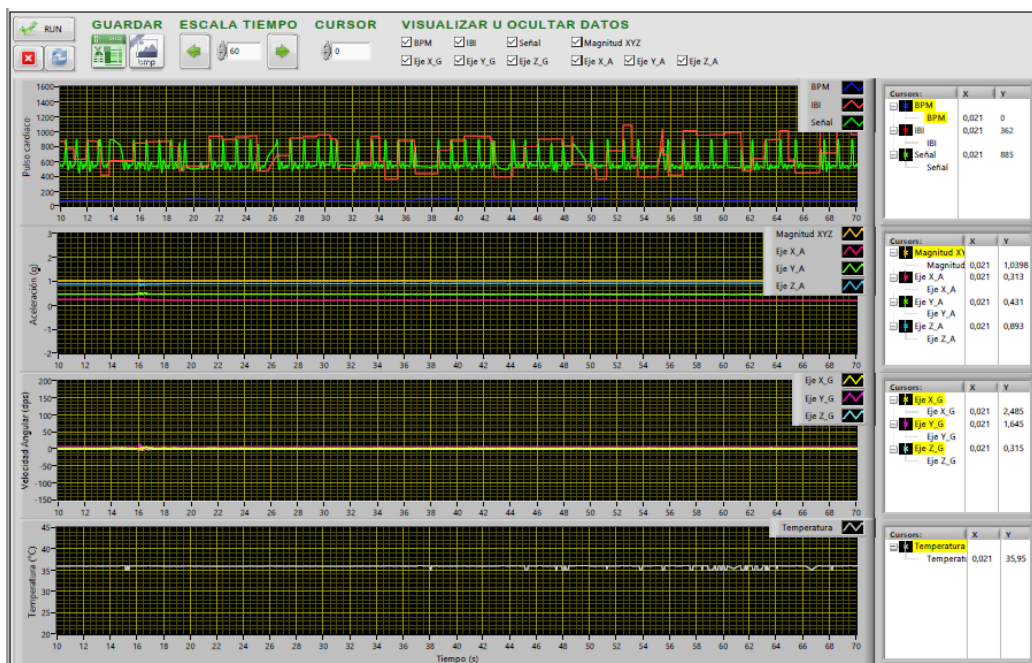


Figura 21. EP-S-02-D, Grupo A, Posición 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

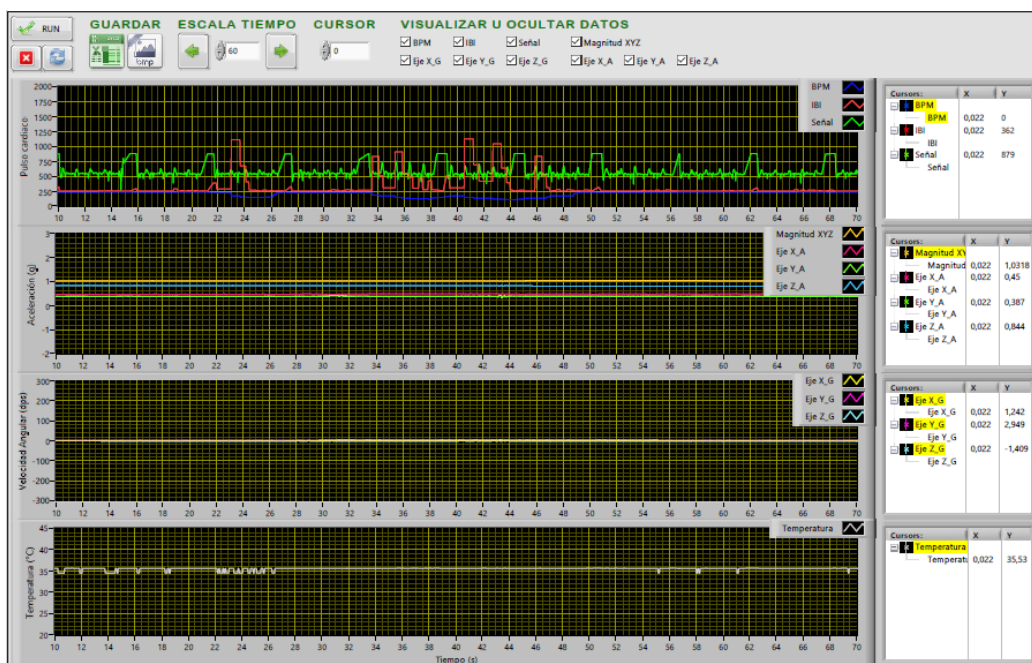


Figura 22. EP-S-17-D, Grupo A, Posición 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 23. EP-C-03-D, Grupo B, Posición 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 24. EP-C-05-D, Grupo B, Posición 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Al observar y comparar las figuras anteriores se evidencia lo siguiente:

En la figura 21 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardiaco (BPM, IBI y Señal) presentan el comportamiento esperado. La frecuencia cardiaca (BPM) se encuentra en el rango de 60 a 100 ppm, la forma de onda de la Señal corresponde con la forma de onda del ritmo cardiaco y el intervalo entre pulsaciones (IBI) va de 400 a 1000 ms en general. Por el contrario, en las figuras 22, 23 y 24 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardiaco contienen valores alejados de la realidad. La forma de onda de la Señal no coincide con la forma de onda del ritmo cardiaco y aún más importante, la frecuencia cardiaca alcanza valores por encima de 220 ppm. Algo imposible, teniendo en cuenta que la persona está en reposo y que la frecuencia cardiaca máxima, durante el ejercicio, se encuentra alrededor de 220 menos la edad.

Las cuatro series de datos relacionadas con la aceleración (magnitud XYZ, eje X_A, eje Y_A y eje Z_A) y las tres series de datos relacionadas con la velocidad angular (eje X_G, eje Y_G y eje Z_G) son planas o lisas en las figuras 21 y 22. En cambio, las mismas series de datos tienen un ligero rizado en las figuras 23 y 24. Con esta característica se pueden diferenciar los sujetos sanos de los sujetos con EP. Se considera que el ligero rizado puede provenir del temblor en reposo propio de la EP.

La serie de datos de temperatura maneja aproximadamente un grado centígrado más de diferencia en las figuras 21 y 22 respecto de las figuras 23 y 24. Con esta característica se pueden diferenciar los sujetos sanos de los sujetos con EP, puesto que los segundos manifiestan mayor sensación de frío y esto se demuestra objetivamente.

8.3.2. Posición 2 (extremidad superior extendida, sin apoyo)

Las figuras 25 y 26 son capturas de pantalla de la interfaz con información de sujetos pertenecientes al grupo A. Las figuras 27 y 28 son capturas de pantalla de la interfaz con información de sujetos pertenecientes al grupo B. La franja de tiempo en las 4 figuras corresponde a la posición 2.

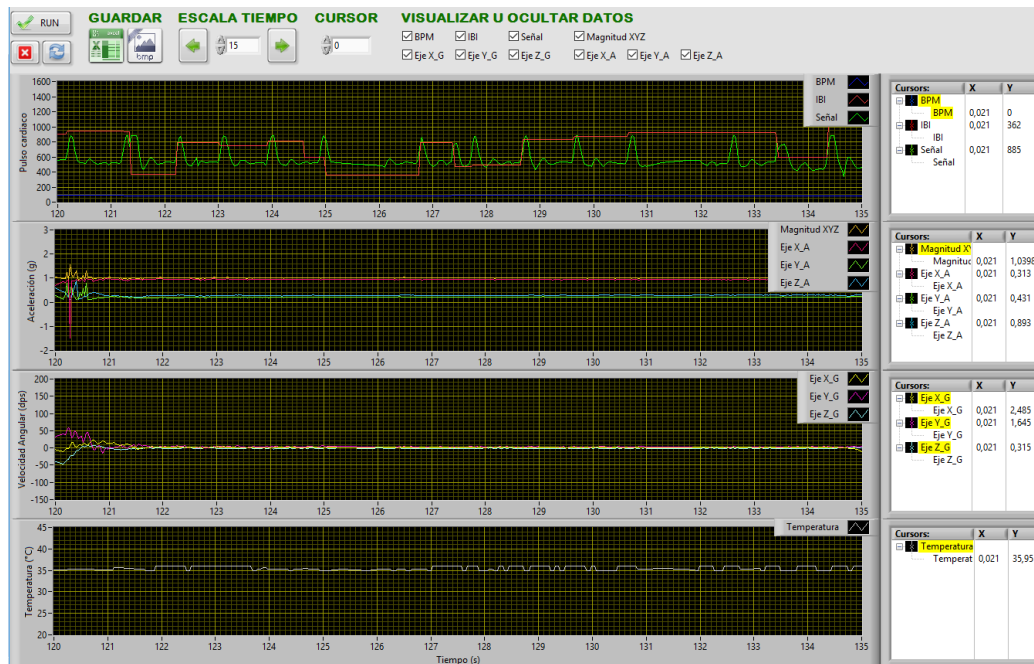


Figura 25. EP-S-02-D, Grupo A, Posición 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

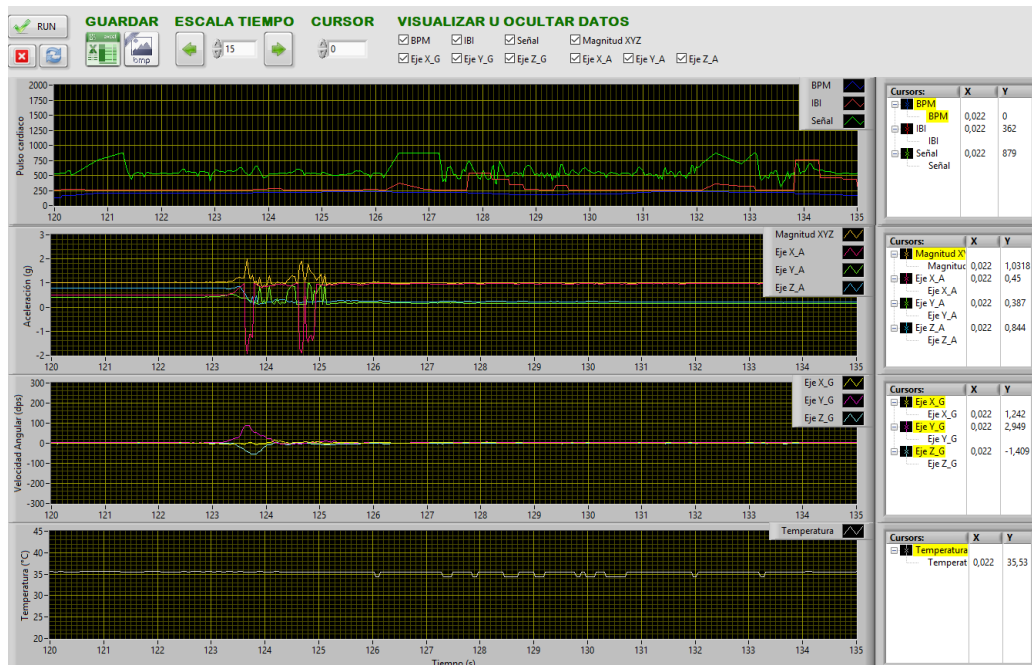


Figura 26. EP-S-17-D, Grupo A, Posición 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

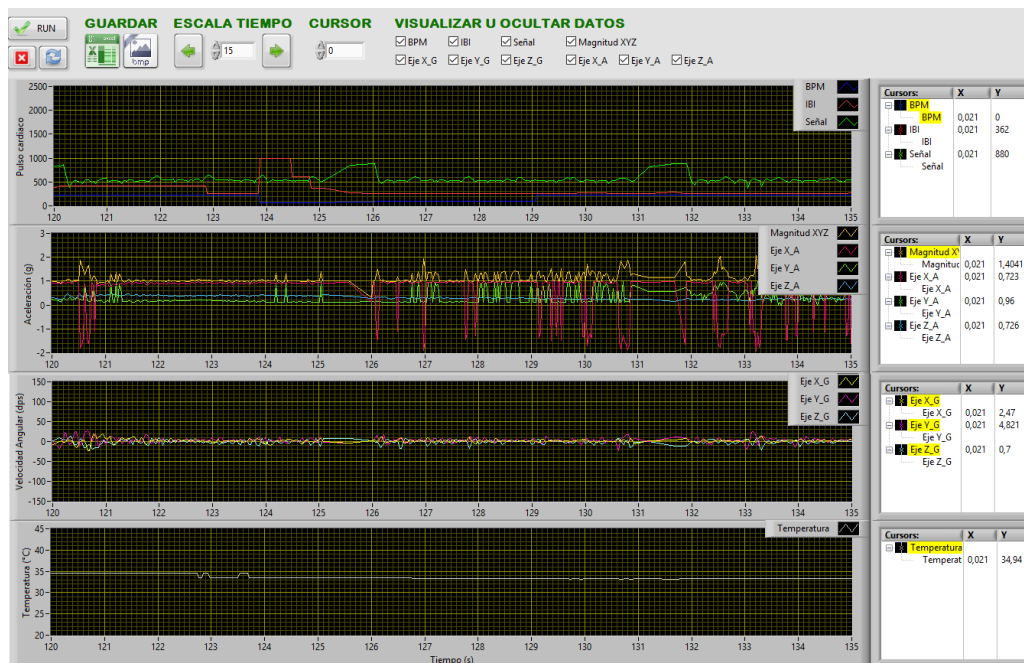


Figura 27. EP-C-06-D, Grupo B, Posición 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 28. EP-C-05-D, Grupo B, Posición 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Al observar y comparar las figuras anteriores se evidencia lo siguiente:

Al igual que en la figura 21, en la figura 25 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardíaco (BPM, IBI y Señal) presentan el comportamiento esperado. Las razones son las expuestas en el ítem anterior y el sujeto es el mismo. En las figuras 26, 27 y 28 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardíaco contienen valores alejados de la realidad. Las razones son las expuestas en el ítem anterior, aun cuando se cambió uno de los sujetos.

En los primeros 5 segundos de la franja examinada, las siete series de datos relacionadas con el movimiento (magnitud XYZ, eje X_A, eje Y_A y eje Z_A, eje X_G, eje Y_G y eje Z_G) exhiben un instante de basculación, producido por el paso de la posición 1 a la posición 2. Posterior al cambio de posición, las series de datos son planas o casi planas en las figuras 25 y 26. En contraste, las mismas series de datos presentan rizado

u oscilaciones más amplias en las figuras 27 y 28. Nuevamente los datos obtenidos permiten diferenciar los sujetos sanos de los sujetos con EP. En la posición 2 el sujeto no tiene apoyo, lo que pone a prueba la capacidad del cuerpo para mantener el equilibrio y la posición de la extremidad superior; el temblor, la discinesia y la rigidez son síntomas de la EP que pueden afectar esta capacidad y propiciar las oscilaciones observadas.

La serie de datos de temperatura maneja aproximadamente un grado centígrado más de diferencia en las figuras 25 y 26 respecto de las figuras 27 y 28, factor que diferencia los sujetos sanos de los sujetos con EP.

8.3.3. Acción 1 (escribir)

Las figuras 29 y 30 son capturas de pantalla de la interfaz con información de sujetos pertenecientes al grupo A, mientras las figuras 31 y 32 son capturas de pantalla con información del grupo B. La franja de tiempo en las 4 figuras corresponde a la acción 1.

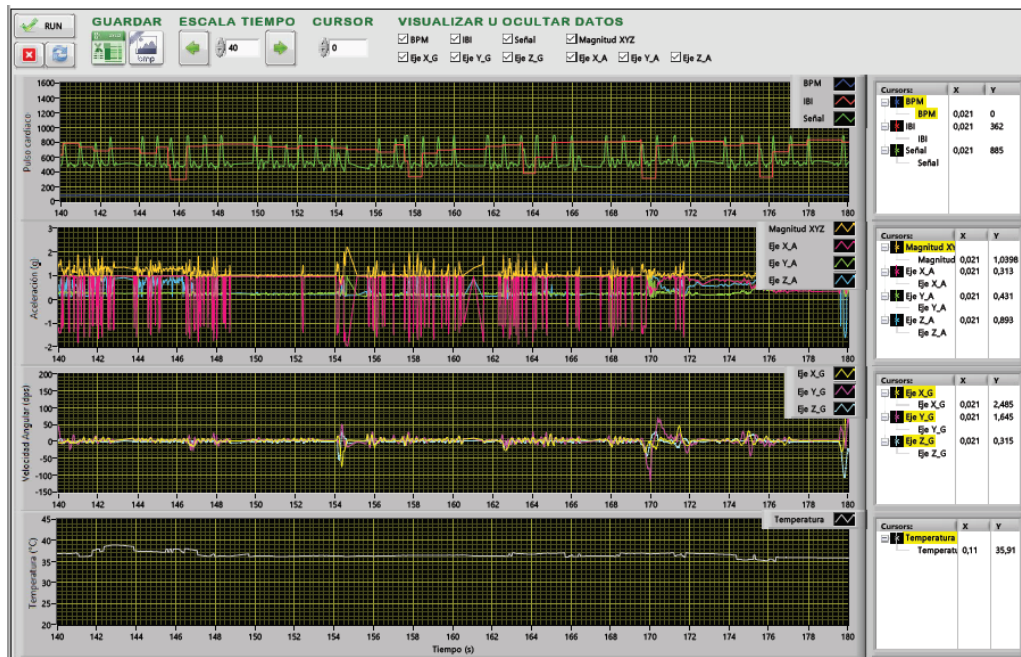


Figura 29. EP-S-02-D, Grupo A, Acción 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 30. EP-S-17-D, Grupo A, Acción 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 31. EP-C-03-D, Grupo B, Acción 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 32. EP-C-05-D, Grupo B, Acción 1

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Al observar y comparar las figuras anteriores se evidencia lo siguiente:

Al igual que en las figuras 21 y 25, en la figura 29 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardiaco (BPM, IBI y Señal) presentan el comportamiento esperado. Las razones son las expuestas en el ítem 8.3.1 y el sujeto es el mismo. En las figuras 30, 31 y 32 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardiaco contienen valores alejados de la realidad. Las razones son las expuestas en el ítem 8.3.1 y los sujetos son los mismos.

Las cuatro series de datos relacionadas con la aceleración (magnitud XYZ, eje X, eje Y y eje Z) se comportan de manera similar en las figuras 29, 30 y 32. En dichas figuras las mayores variaciones de aceleración se producen en el eje X. Se deduce que el sujeto de la figura 31 adoptó una posición diferente a los demás sujetos, al momento de escribir. Pues en esa figura, las mayores variaciones de aceleración se producen en el eje Z. Las tres

series de datos relacionadas con la velocidad angular (eje X, eje Y y eje Z) se comportan de manera similar en las figuras 29, 30, 31 y 32. En general en las 4 figuras se produce un rizado, cuya variación de magnitud no sobrepasa el rango de -50 a 50 dps. El movimiento examinado en la franja no permite distinguir los sujetos sanos de los sujetos con EP.

Nota: no se comparó el tiempo que duró cada sujeto escribiendo, porque no hubo uniformidad en la frase escrita. Algunos participantes solo sabían escribir su nombre.

En general la serie de datos de temperatura es mayor en las figuras 29 y 30 respecto a las figuras 31 y 32, factor que diferencia los sujetos sanos de los sujetos con EP.

8.3.4. Acción 2 (saludar)

Las figuras 33 y 34 son capturas de pantalla de la interfaz con información de sujetos pertenecientes al grupo A, mientras las figuras 35 y 36 son capturas de pantalla con información del grupo B. La franja de tiempo en las 4 figuras corresponde a la acción 2.

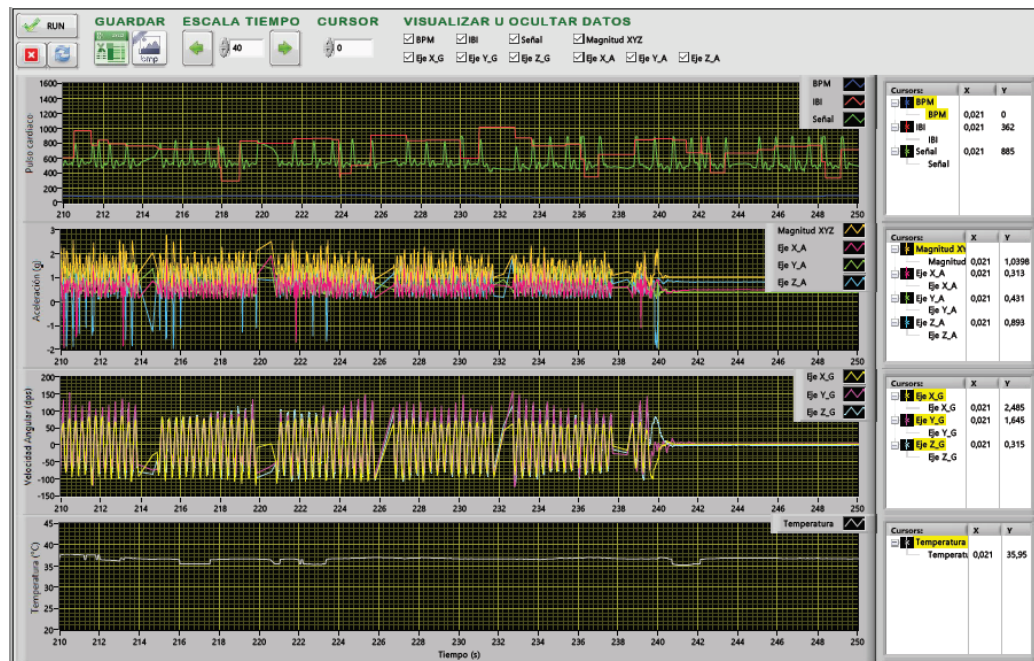


Figura 33. EP-S-02-D, Grupo A, Acción 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 34. EP-S-17-D, Grupo A, Acción 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 35. EP-C-01-D, Grupo B, Acción 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.



Figura 36. EP-C-06-D, Grupo B, Acción 2

Fuente: Elaboración propia Lopez S.

Al observar y comparar las figuras anteriores se evidencia lo siguiente:

Al igual que en las figuras 21, 25 y 29, en la figura 33 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardiaco (BPM, IBI y Señal) presentan el comportamiento esperado. Las razones son las expuestas en el ítem 8.3.1 y el sujeto es el mismo. En las figuras 34, 35 y 36 las tres series de datos relacionadas con el pulso cardiaco contienen valores alejados de la realidad. Las razones son las expuestas en el ítem 8.3.1, aun cuando 2 sujetos son diferentes. Como dato curioso, la frecuencia cardiaca en la figura 35 tuvo valores entre 60 y 100 ppm durante 10 segundos.

Las siete series de datos relacionadas con el movimiento (magnitud XYZ, eje X_A, eje Y_A y eje Z_A, eje X_G, eje Y_G y eje Z_G) forman oscilaciones “periódicas” con picos de amplitud casi homogénea en las figuras 33 y 34. Las mismas series forman oscilaciones con picos de innegable amplitud variada en las figuras 35 y 36. En adición, las

oscilaciones en las figuras 33 y 34 tienen mayor amplitud que las oscilaciones en las figuras 35 y 36. De nuevo los datos obtenidos permiten diferenciar los sujetos sanos de los sujetos con EP. En los sujetos con EP la rigidez perturba la fluidez y fuerza del movimiento ejercido al saludar, volviéndolo más débil, impreciso y menos pronunciado en comparación con sujetos sanos.

Los valores de la serie de datos de temperatura en las figuras 33 y 34 con respecto a la figura 36, son mayores. La serie de temperatura en la figura 35 maneja valores cercanos a la misma serie en la figura 34.

8.3.5. Síntesis

El resultado del análisis de las tres series de datos relacionadas con el pulso cardíaco (BPM, IBI y Señal) se repitió en las cuatro tareas asignadas. Se observó que los datos de BPM, IBI y Señal, están dentro del estipulado en solamente uno de los sujetos examinados (EP-S-02-D). Estipulado hace referencia a: una frecuencia cardíaca (BPM) de 60 a 100 ppm; una forma de onda de Señal como la forma de onda del ritmo cardíaco; y un intervalo entre pulsaciones (IBI) de 400 a 1000 ms. Los mismos datos en los demás sujetos no se consideran válidos. Naturalmente hay personas que pueden manejar una frecuencia cardíaca por encima o por debajo del estipulado, sin embargo, los valores no estarían tan alejados como los datos adquiridos; especialmente porque la prueba se realizó con los sujetos en reposo. En vista de los hechos, hay una falencia en la adquisición del pulso cardíaco, que repercute negativamente en la forma de onda de la Señal y en los valores de BPM e IBI.

El resultado del análisis de las siete series de datos relacionadas con el movimiento (magnitud XYZ, eje X_A, eje Y_A y eje Z_A, eje X_G, eje Y_G y eje Z_G)

permitió diferenciar con facilidad, el grupo A del B en tres de las cuatro tareas asignadas. A modo personal, diría que las gráficas de datos adquiridos en sujetos sanos son más limpias, precisas y estables que las gráficas de datos adquiridos en sujetos con EP. Cuando no hay movimiento las series son planas o casi planas en los sujetos del grupo A. En el grupo B las series tienden a ser planas, pero con rizado; como si los sujetos con EP presentaran una postura o movimiento con mayor error en estado estable, provocado por la incapacidad del cuerpo para seguir las órdenes del cerebro y controlar la rigidez, el temblor o la discinesia. Cuando hay movimiento la serie oscila marcando un patrón de acción en ambos grupos, que difiere en magnitudes, en tiempo o en reproducibilidad. La escritura fue la tarea en la que no se pudo distinguir los sujetos del grupo A de los sujetos del grupo B, aunque se anotó que la acción no fue uniforme en la totalidad de la muestra.

El resultado del análisis de la serie de datos de temperatura se repitió en las cuatro tareas asignadas y permitió diferenciar los sujetos sanos de los sujetos con EP. La serie en los sujetos del grupo A contiene valores de temperatura mayores a la serie de los sujetos del grupo B. Solo los sujetos EP-C-01-D en la Acción 2 y EP-C-05-D en la Acción 1 presentan valores similares a los sujetos sanos, por breves instantes de tiempo.

Recuérdese que los síntomas de la EP varían de persona a persona, tanto en magnitud como en evolución y aparición.

9. Conclusiones

Se desarrolló un dispositivo electrónico para la adquisición de señales asociadas a la Enfermedad de Parkinson (EP). El prototipo construido es multivariable y se empleó en una muestra estratificada de 14 personas, sanas y con EP. El propósito englobado del sistema es adquirir, procesar, guardar y mostrar información (textual y gráfica) sobre el pulso cardíaco, el movimiento y la temperatura de la mano. En total son 10 variables de entrada del dispositivo, más una variable interna (Magnitud XYZ) calculada dentro de la interfaz, cuyo análisis puede aumentar la precisión del diagnóstico y reducir la incertidumbre en la diferenciación con otros trastornos. Las variables escogidas son el fruto de la consulta de artículos y otro tipo fuentes académicas que tratan la sintomatología de la EP; también atañen a las capacidades técnicas de los sensores.

Se resalta la utilidad de la interfaz gráfica, pues en ella se pueden abrir archivos no generados por el dispositivo electrónico construido, siempre y cuando el archivo tenga ciertas características. La interfaz es muy amigable e intuitiva. Su diseño permite la creación de imágenes y archivos Excel, previendo que el usuario desee realizar otros análisis fuera de la interfaz. La interfaz gráfica creada es un producto registrado ante la Dirección Nacional de Derecho de Autor, con radicación de entrada 1-2018-67923, Libro - Tomo – Partida 13-68-364 y fecha de registro 23-ago-2018.

Siguiendo el paso a paso de la metodología, se examinaron trabajos previos en el área de estudio; se describieron las variables y los componentes del dispositivo; se diseñó, construyó y detalló la arquitectura de hardware y software del prototipo; se modeló la interfaz gráfica; se puso a prueba el dispositivo, se recolectó información con el mismo y se analizó parte de los datos en la interfaz.

Referente al análisis de resultados de las pruebas de funcionamiento, se puede afirmar que la información obtenida es muy alentadora; en 8 de las 11 variables, se pudo discriminar con rigor los sujetos sanos de los sujetos con EP. Las 3 variables sin respuesta positiva se relacionan con el pulso cardiaco (BPM, IBI y Señal); en realidad ni se compararon en los grupos de la muestra, porque se determinó que gran parte de los archivos contenía datos erróneos.

A pesar de los avances en las técnicas de imágenes y en la identificación de biomarcadores, los métodos cuantitativos de progresión de la enfermedad siguen siendo confusos y los costos los hacen poco accesibles a la población general. El seguimiento de la respuesta al tratamiento en la EP, sigue siendo clínico y se basa casi siempre en los criterios de escalas subjetivas como se ha mencionado. No obstante, existen formas de medir algunos de los síntomas de la EP; como el temblor que es los más comunes, sin ser exclusivo de la EP. En este trabajo diferencias notorias en el movimiento y la temperatura corporal de personas sanas y personas con EP.

Como trabajo futuro, se corregiría la adquisición de las variables de entrada ligadas al pulso cardiaco, cambiando el sensor, su ubicación y/o su ajuste. Se extenderían las capacidades del sistema, para adquirir más variables con las que se puedan valorar otros síntomas de la enfermedad. Se robustecería el prototipo, filtrando el ruido, blindando los conectores y calibrando los sensores con un instrumento patrón. Se le añadiría mayor rigurosidad a las pruebas, asignando otras o más tareas, ampliando la muestra con grupos de sujetos con trastornos similares a la EP y asegurando la uniformidad de las pruebas.

Referencias

- Adam V. (s.f.) Principles of neurology, fifth edition. Edit. Mc-Graw Hill. 975-976
- Aldave, S., López, M., & Varela, S. (2014). En *Características y necesidades de las personas en situación de dependencia* (pág. 105). Madrid: Paraninfo.
- Alves G., Wentzel-Larsen T., Aarsland D. y Petter Larsen J. Progression of motor impairment and disability in Parkinson disease. *Neurology* November 8, 2005 vol. 65 no. 9 1436-1441
- American Society of Health-System Pharmacists . (s.f.). *Levodopa y Carbidopa: ¿Cuáles son los efectos secundarios que podría provocar este medicamento?* Obtenido de <https://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/druginfo/meds/a601068-es.html#side-effects>
- Asociación Parkinson Bizkaia Asparbi. (11 de Abril de 2017). El estudio del sudor y la temperatura de la piel sirve para diagnosticar el Parkinson. Deia, Editorial Iparraguirre. Recuperado el 2017, de <http://www.deia.eus/2017/04/11/sociedad/euskadi/el-estudio-del-sudor-y-la-temperatura-de-la-piel-sirve-para-diagnosticar-el-parkinson>
- Bermea Maldonado, A. V., & Bravo Guamán, M. F. (Marzo de 2016). Diseño y desarrollo de un sistema inalámbrico que permita monitorear los temblores en pacientes que padecen la enfermedad de Parkinson utilizando software y hardware libre (Tesis de pregrado). 97. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Boeve, B., & Silber, M. (2008). Trastornos del sueño en la enfermedad de Parkinson. En National Parkinson Foundation, R. Martine, & J. Duda (Edits.), *La Enfermedad de Parkinson: Mente, Estado de Ánimo y Memoria* (págs. 58-75).

BrooksD., FreyK., MarekK., OakesK., Paty D., Prentice R., Shults C. andStoessl A.

Assessment of neuroimaging techniques as biomarkers of the progression of Parkinson's disease. The lancet neurology, vol 6, issue 10

Centers for Disease Control and Prevention. (10 de Agosto de 2015). Target Heart Rate and Estimated Maximum Heart Rate. Atlanta, Georgia, USA. Recuperado el 2017, de <https://www.cdc.gov/physicalactivity/basics/measuring/heartrate.htm>

Chacha Cajamarca, F. J. (2017). Diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo inalámbrico para estimular ejercicios de rehabilitación en pacientes con Parkinson (Tesis de pregrado). 157. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

Chaná C., Jiménez C. Díaz V. And Juri C. mortality rates in Chile.Rev. méd. Chile vol.141 no.3 Santiago mar. 2013

Chaudhuri R., Healy D. y Schapira FmedSci A. Non-motor symptoms of Parkinson's disease: diagnosis and management.The Lancet Neurology, Volume 5, Issue 3, Pages 235 - 245, March 2006

Comunidad de Madrid. (6 de Abril de 2015). *Nuevo software para detectar el párkinson de forma precoz*. Obtenido de Hospital Universitario 12 de Octubre: www.madrid.org/cs/Satellite?cid=1354423982230&language=es&pageid=1142403620150&pagename=Hospital12Octubre%2FCM_Actualidad_FA%2FH12O_actualidad

CuidatePlus. (2017). *¿Qué es el parkinsonismo?* (U. E. S.L., Editor) Recuperado el 2017, de <http://www.dmedicina.com/enfermedades/neurologicas/2002/05/27/que-parkinsonismo-6821.html>

European Parkinson's Disease Association. (s.f.). *About parkinson's: how is parkinson's diagnosed?* Recuperado el 27 de Junio de 2016, de <http://www.epda.eu.com/about-parkinsons/diagnosis/how-is-parkinsons-diagnosed/>

European Parkinson's Disease Association. (s.f.). *About Parkinson's: What is Parkinson's?* Recuperado el 2016 de Junio de 24, de <http://www.epda.eu.com/about-parkinsons/what-is-parkinsons/>

Evatt, M. L., Chaudhuri, K. R., Chou, K. L., Cubo, E., Hinson, V., Kompoliti, K., ... & Stebbins, G. T. (2009). Dysautonomia rating scales in Parkinson's disease: sialorrhea, dysphagia, and constipation—critique and recommendations by movement disorders task force on rating scales for Parkinson's disease. *Movement disorders: official journal of the Movement Disorder Society*, 24(5), 635-646.

Exner N., Kathrin A., Haass C and Winklhofer K. Mitochondrial dysfunction in Parkinson's disease: molecular mechanisms and pathophysiological consequences. *The EMBO Journal* (2012) 31, 3038–3062

Fazio, P., Granieri, G., Casetta, I., Cesnik, E., Mazzacane, S., Caliandro, P., . . . Granieri, E. (Abril de 2013). Gait measures with a triaxial accelerometer among patients with neurological impairment. *Neurological Sciences*, 34(4), 435-440.

Findley, L. J., Gresty, M. A., & Halmagyi, G. M. (1981). Tremor, the cogwheel phenomenon and clonus in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 44(6), 534-546.

Franco, S. (2002). *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. Third Edition. United States: McGraw-Hill, 680 p.

García Mejía, J. F., Flores Fuentes, A. A., Pérez Martínez, J. A., Torres Reyes, C. E., & González Matias, S. (2015). Un sistema de medición del temblor parkinsoniano, una

- alternativa no invasiva basada en instrumentación virtual. *Revista Aristas: Investigación Básica y aplicada*, 4(7), 38-42.
- Gelb D., Oliver E., y Gilman S. Diagnostic Criteria for Parkinson Disease. *Arch Neurol.* 1999; 56(1):33-39
- Goetz C., Lutge W., and Tanner C. Autonomic dysfunction in Parkinson's disease. *Neurology* January 1986 vol. 36 no. 1 73
- Goetz, C. G., Tilley, B. C., Shaftman, S. R., Stebbins, G. T., Fahn, S., Martinez-Martin, P., . . . LaPelle, N. (2008). Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale (MDS-UPDRS): Scale Presentation and Clinimetric Testing Results. *Movement Disorders*, 23(15), 2129-2170.
- Gómez, J. C. (18 de Enero de 2017). El corazón delata el párkinson antes de que aparezca. *Sanitaria* 2000. Recuperado el 2017, de <https://www.redaccionmedica.com/secciones/neurologia/el-corazon-delata-la-el-parkinson-antes-de-que-aparezca-8620>
- Gómez, R., Hudson, L., & Venegas, P. (Enero de 2011). Trastornos autonómicos en enfermedad de Parkinson. *Revista Médica de Chile*, 139(1), 100-106. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872011000100014>
- Gray, P and R. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. Third Edition. United States, Prentice-Hall. 1993. 792 p.
- Guridi J., González-Redondo, and Obeso J. Clinical Features, Pathophysiology, and Treatment of Levodopa-Induced Dyskinesias in Parkinson's Disease. *Parkinson's Disease* Volume 2012, Article ID 943159, 15 pages

in-patient.es. (9 de Octubre de 2017). *La diplopia (visión doble) puede ser un factor predictivo de las alucinaciones visuales en la enfermedad de Parkinson*. Obtenido de <https://www.in-patient.es/noticia/diplopia-vision-doble-puede-ser-factor-predictivo-de-alucinaciones-visuales-en-enfermedad-de-parkinson/>

Instituto Nacional de Trastornos Neurológicos y Accidentes Cerebrovasculares NIH. (2017). *Enfermedad de Parkinson*. Recuperado el 2017, de MedlinePlus: <https://medlineplus.gov/spanish/parkinsonsdisease.html>

Jankovic J. Parkinson's disease: clinical features and diagnosis. *NeurolNeurosurg Psychiatry* 2008;79:368-376 doi:10.1136/jnnp.2007.131045

Jankovic, J., & Tolosa, E. (1993). Parkinson's disease and movement disorders. *Parkinson's disease and movement disord*

La Prensa. (6 de Septiembre de 2015). El lápiz que ayuda a detectar Alzheimer y el Parkinson. *La Prensa*. Obtenido de <https://www.laprensa.hn/tecnologia/876882-410/el-l%C3%A1piz-que-ayuda-a-detectar-el-alzh%C3%A9imer-y-el-parkinson>

LeMoyne, R., Mastroianni, T., & Grundfest, W. (2013). Wireless accelerometer configuration for monitoring Parkinson's disease hand tremor. *Advances in Parkinson's Disease*, 2(2), 62-67. doi:10.4236/apd.2013.22012

Liu B., Swanson C. Rick J., Weintraub D., Hurtig H., Trojanowski H. and Chen-Plotkin A. An Aptamer-Based Screen of 1000+ Plasma Proteins for Diagnostic Biomarkers in Parkinson's Disease (P4.047). *Neurology* April 8, 2014 vol. 82 no. 10 Supplement P4.047

Lonneke M. Dagmar Verbaan D., Marinus J y vanHilten J. Survival in Parkinson's disease.

Relation with motor and non-motor features. *Parkinsonism & Related Disorders*.

Volume 20, issue 6, pages 613-616, June 2014

Luk K. Modeling Lewy pathology propagation in Parkinson's disease *Parkinsonism &*

Related Disorders. Volume 20, Supplement 1 , Pages S85-S87, January 2014

Lunar M., Peña E. y Gutierrez C. Fenómenos on-off de conducta en la Enfermedad de

Parkinson. *Psiquiatríabiológica* 2003; 10(1):36-41

Merello, M. (2008). Trastornos no motores en la enfermedad de Parkinson. *Revista de*

Neurología, 47(5), 261-270.

Morrish P., Rakshi J., Bailey D., Sawle G. Et al. Measuring the rate of progression and

estimating the preclinical period of Parkinson's disease with [18F] dopa PET. *J*

NeurolNeurosurg Psychiatry 1998;64:314-319

Movement Disorder Society Task Force on Rating Scales for Parkinson's Disease. The

Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS): status and recommendations.

MovDisord. 2003 Jul;18(7):738-50.

National Institute of Neurological Disorders and Stroke NIH, National Institutes of Health.

(20 de Diciembre de 2016). *Enfermedad de Parkinson: Esperanza en la*

investigación. Recuperado el 06 de Septiembre de 2017, de

http://espanol.ninds.nih.gov/trastornos/parkinson_disease_spanish.htm#sintomas

National Institutes of Health NIH. (26 de Enero de 2017). Pulse. (Medline Plus, & US

National Library of Medicine, Edits.) Bethesda, US: NIH. Recuperado el 2017, de

<https://medlineplus.gov/ency/article/003399.htm>

National Institutes of Health NIH. (26 de Enero de 2017). Temperatura corporal normal.

Bethesda, USA. Recuperado el 2017, de <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/001982.htm>

National Instruments NI. (12 de Febrero de 2015). *Los Beneficios de la Programación*

Gráfica en LabVIEW. Recuperado el 2017, de <http://www.ni.com/white-paper/14556/es/>

Palmeniri, L., Rocchi, L., Mellone, S., Valzania, F., & Chiari, L. (2011). Feature selection for accelerometer-based posture analysis in Parkinson's Disease. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 15(3), 481-490.

Patten J. Neurological differential diagnosis, Springer, 2 edition. 186-187. 1996

Pérez Conde, C. (1996). *Sensores ópticos* (1 ed.). Valencia: Universidad de Valencia.

Pradilla, G., Vesga, B. E., León-Sarmiento, F. E., & Geneco, G. (2003). Estudio neuroepidemiológico nacional (EPINEURO) colombiano. *Rev. Panamericana de la Salud*, 14(2), 104-111. Recuperado de: <http://www.scielosp.org/pdf/rpsp/v14n2/a05v14n2.pdf>


Punin Sigcha, B. C., & Barzallo Córdoba, B. J. (Abril de 2017). Diseño, desarrollo e implementación de un dispositivo inalámbrico para detección de episodios de congelamiento de la marcha en pacientes con enfermedad de Parkinson. 77. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

Rodríguez Pupo, J. M., Díaz Rojas, Y. V., Rojas Rodríguez, Y., Ricardo Rodríguez, Y., & Aguilera Rodríguez, R. (2013). Actualización en enfermedad de Parkinson idiopática. *Correo Científico Médico CCM*, 17(2), 163-177.

- Santos-García, D., Aneiros Díaz, A., Macías-Arribi, M., Llana-Gonzalez, M., Abella Corral, J., & Santos-Canelles, H. (2010). Síntomas sensoriales en la enfermedad de Parkinson. *Revista de Neurología*, 50(2), 65-74.
- Simón Pérez, E., Aguilera Pacheco, O. R., Núñez Lahera, I., & Colina Avila, E. (2017). Síntomas no motores en pacientes con enfermedad de Parkinson. *MEDISAN*, 21(6), 681-687.
- Sociedad Iberoamericana de Información Científica SIIC. (11 de Enero de 2016). *IntraMed*. Obtenido de Pacientes con enfermedad de Parkinson que presentan fatiga: <https://www.intramed.net/contenido.asp?contenidoID=88225>
- Torres, R., Clotet, R., Gonzalez, R., Pirrone, J., Sagbay, G., Rivas, D., & Soto, A. (2015, September). Analysis of corporal movement alterations using a 3D body tracking sensor. In Systems Engineering (ISSE), 2015 IEEE International Symposium on (pp. 202-205). IEEE.
- Tripoliti, E., Tzallas, A., Tsipouras, M., Rigas, G., Bougia, P., Leontiou, M., . . . Fotiadis, D. (Abril de 2013). Automatic detection of freezing of gait events in patients with Parkinson's disease. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 110(1), 12-26. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2012.10.016>
- Weintraub, D. (2008). Cambios emocionales en la enfermedad de Parkinson. En National Parkinson Foundation, R. Martine, & J. Duda (Edits.), *La Enfermedad de Parkinson: Mente, Estado de Ánimo y Memoria* (págs. 8-19).
- Xu J., Kao S., Lee F., Song W., Jin L. and Yankner B. Dopamin-dependent neurotoxicity of alfa-synuclein: A mechanism for selective neurodegeneration in Parkinson disease. *Nature Medicine* 8, 600-606 (2002)

Anexo 1.

Formato de consentimiento informado

	<p align="center">Consentimiento Informado para Participantes en Test Dispositivo Médico para Adquirir Señales y Síntomas de la Enfermedad de Parkinson</p>	VERSION: 08 MARZO 2018
		TRD: 500-510-472

Acepto participar en este test de manera completamente voluntaria. Me han informado que las tareas de este test son: (1) adquirir señales biológicas con un dispositivo médico situado en el brazo del participante; (2) practicar una encuesta al participante, en torno a su historia clínica y la Enfermedad de Parkinson (EP); (3) establecer características, similitudes o diferencias entre participantes mediante el análisis de la información obtenida. También, me han comunicado que este test hace parte de una investigación con la que se desea: (1) contribuir a la generación de un diagnóstico más preciso, rápido y confiable de la EP, derivado del análisis del conjunto de variables medidas por el dispositivo; (2) mejorar el tratamiento de la EP y disminuir la incertidumbre en su diferenciación respecto a otros trastornos del movimiento; (3) servir de referente a futuros proyectos en el área de estudio.

Certifico que puedo ser sujeto de estudio de este test, porque soy un ciudadano mayor de edad en Colombia (18 años), con o sin el padecimiento de la EP y consciente de mi estado médico actual. Concibo que al participar en este test tendré que usar el dispositivo médico, atender las instrucciones de quienes aplican el test, suministrar datos personales y responder la encuesta con veracidad; todo esto durante aproximadamente 20 minutos. Asimismo, comprendo que no recibiré pago, ni tendré gasto alguno por participar.

Reconozco que la información que provea en el curso de este test es estrictamente confidencial y no será usada, sin mi consentimiento, para propósitos fuera de los inherentes a la investigación. Sé que puedo hacer preguntas sobre el test y retirarme del mismo, en cualquier momento, sin acarrear perjuicio alguno para mi persona. Me han notificado que durante la aplicación del test es posible que se tome evidencia audiovisual, sólo si lo autorizo.

El test y todo lo que encierra podrá utilizarse para la divulgación científica en forma verbal (oral o escrita).

Aclaro que he leído y entendido cada párrafo de este documento, para constancia firmo en _____ (ciudad) el ____ del mes de _____ de 20____.

Nombre completo Cédula Firma

SANDRA MARCELA LÓPEZ TORRES y FRANKLIN ALBERTO FAJARDO VILLANUEVA
Estudiantes de Ingeniería Electrónica
Corporación Universidad de la Costa CUC